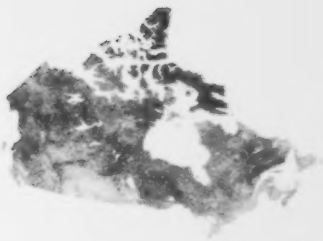


LES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES COMMERCIAUX :

GUIDE DE L'ACHETEUR

Ressources naturelles Canada
Natural Resources Canada

Canada

Préface

La présente publication est diffusée uniquement à titre d'information. Elle ne reflète pas nécessairement les points de vue du gouvernement du Canada et ne recommande aucun produit sur le marché, ni n'appuie aucune personne. Ni le Canada ni ses ministres, hauts fonctionnaires, employés et agents ne garantissent le contenu du présent guide et n'assument aucune responsabilité relativement à son contenu.

Photographie

Toutes les photographies (sauf celle de la page couverture) sont une gracieuseté du Geothermal Heat Pump Consortium, Inc., 701 Pennsylvania Avenue, N.W., Washington DC 20004-2696, U.S.A.

La présente publication a été préparée par le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET – Varennes, CANETA Research et le Groupe conseil Technosim, pour le compte de la Division de l'énergie renouvelable et électrique, Direction des ressources énergétiques, Ressources naturelles Canada.

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2002
ISBN 0-662-87736-5
N° de catalogue : M92-251/2002F
This publication is also available in English under the title:
Commercial Earth Energy Systems: A Buyer's Guide

À PROPOS DU GUIDE

Les systèmes géothermiques commerciaux : Guide de l'acheteur vise à renseigner les propriétaires d'immeubles, les gestionnaires d'installations, les planificateurs d'actifs immobiliers, les architectes, les ingénieurs, les fournisseurs d'énergie, les entreprises de services éconergétiques, les conseillers en énergie, les concepteurs d'outils de systèmes d'aide à la décision (SAD), les entrepreneurs en mécanique du bâtiment, les hydrologues, les géologues ainsi que les entreprises d'excavation et de forage afin de les aider à comprendre, à planifier, à coordonner, à concevoir, à construire et à gérer les systèmes géothermiques pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments commerciaux et institutionnels.

PARTIE 1

Le Guide comprend deux parties principales. La partie 1 renferme de l'information de base pour répondre aux questions des décideurs qui ont peu ou pas de connaissances des systèmes géothermiques. Elle comprend les sections suivantes :

- Le chapitre 1 présente une introduction aux systèmes géothermiques, c'est-à-dire leur nature, leur emplacement optimal, leur mode de fonctionnement et les économies engendrées par rapport à d'autres systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air (CVC). Le lecteur trouvera cette information utile comme point de départ.
- Le chapitre 2 décrit les diverses configurations ou types de systèmes, et les facteurs dont il faut tenir compte avant d'en choisir un. Ce chapitre comprend également les descripteurs d'efficacité énergétique des pompes à chaleur utilisées dans ces systèmes, et aborde l'importance générale de l'efficacité énergétique des bâtiments.
- Le chapitre 3 présente un bref aperçu de la conception d'un système géothermique.
- Le chapitre 4 aborde d'autres aspects importants, uniques aux systèmes géothermiques, notamment les considérations d'ordre environnemental et légal, la planification, l'installation et les questions de garanties et d'entretien.

PARTIE 2

La partie 2 porte sur des questions plus complexes et sur des détails techniques, que l'on retrouve dans les chapitres suivants :

- Le chapitre 5 consiste en un examen détaillé des questions qui ont trait au rendement et à la performance de la pompe à chaleur.

- Le chapitre 6 aborde l'évaluation et le calcul des charges et de la consommation d'énergie du bâtiment.
- Le chapitre 7 explique les exigences du dimensionnement des pompes à chaleur et des boucles souterraines. Il renferme également un certain nombre de modèles de calcul à cette fin.
- Le chapitre 8 expose les facteurs dont il faut tenir compte dans l'analyse de l'investissement que représente un système géothermique, et donne un exemple de calcul.
- Le chapitre 9 porte sur des questions pratiques à prendre en compte dans la conception et l'installation de systèmes géothermiques. On y retrouve un modèle de spécification de rendement, à utiliser comme guide général. De plus, il renferme une liste des renseignements importants à obtenir auprès des fournisseurs et des entrepreneurs.

Les annexes du Guide contiennent des études de cas sur des systèmes géothermiques, d'autres sources de renseignements qui seront utiles à divers stades de la prise de décision et de la mise en œuvre, un glossaire et un tableau de conversion pour faciliter les calculs.

Note au sujet des règles approximatives

Un certain nombre de règles approximatives sont présentées dans le Guide. Elles contribuent à évaluer des ordres de grandeur et devraient servir exclusivement de lignes directrices.

TABLE DES MATIÈRES

À PROPOS DU GUIDE i
Note au sujet des règles approximatives ii

PARTIE 1 | SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES – NOTIONS DE BASE

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION
Historique 2
Qu'est-ce qu'un système géothermique? 3
Principes de fonctionnement de la pompe à chaleur 4

FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES
Principe de base 5
Aperçu du cycle de réfrigération 5
Composants des systèmes géothermiques 6

AVANTAGES DES SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES
Température du sol constante 7
Énergie renouvelable 7
Souplesse 7
Espace et économies de coût 8
Efficacité énergétique et avantages environnementaux 8
Avantages pour la société 9
Rentabilité 9
Règles approximatives concernant les coûts 12

CHAPITRE 2 : LE CHOIX D'UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE
Choix d'un type de système 13
Boucle souterraine 13
Pompes à chaleur 19
Système de distribution 25
Eau chaude sanitaire 27
Facteurs liés au bâtiment 29
Facteurs liés à l'efficacité énergétique 30

CHAPITRE 3 : CONCEPTION DE LA BOUCLE SOUTERRAINE
Séquence de conception typique 32
Conception de la boucle souterraine 33
Tour de refroidissement : évacuation de la chaleur excédentaire 34
Chauffage d'appoint 35
Étapes types d'installation d'un système géothermique 36

CHAPITRE 4 : FACTEURS IMPORTANTS
Facteurs environnementaux 37
Législation 39
Planification, installation et sécurité 41
Garantie et vie utile 42
Entretien 42

PARTIE 2 : CONCEPTS AVANCÉS

CHAPITRE 5 : RENDEMENT ET PERFORMANCE DES POMPES À CHALEUR
Sources et puits de chaleur et élévation de température 44
Sources et puits de chaleur typiques 45
Évaluation du rendement d'une pompe à chaleur 45
Facteurs influant sur le rendement d'une pompe à chaleur 46
Cotes de rendement des pompes à chaleur 47

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES CHARGES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT ET DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE
Évaluation des charges du bâtiment 49
Calcul des charges de chauffage et de refroidissement 49
Calcul de la consommation d'énergie 52

CHAPITRE 7 : DIMENSIONNEMENT DES POMPES À CHALEUR ET DES BOUCLES SOUTERRAINES
Dimensionnement des pompes à chaleur 54
Préconditionnement de l'air extérieur 54
Dimensionnement de la boucle souterraine 55
Règles approximatives de dimensionnement des boucles verticales 57
Exemple de calcul de dimensionnement : boucle verticale 59
Règles approximatives de dimensionnement des boucles horizontales . . . 60
Exemple de calcul de dimensionnement : boucle horizontale 62
Règles approximatives de dimensionnement des boucles à eau souterraine 64
Exemple de calcul de dimensionnement : boucle à eau souterraine 66

CHAPITRE 8 : INVESTIR DANS UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE
Critères d'investissement 67
Exemple de calcul 68

CHAPITRE 9 : ASPECTS PRATIQUES
Boucles souterraines 70
Problématique de l'utilisation de l'eau : les puits 72
Lignes directrices en matière de pompage 73
À propos des tarifs d'électricité 74
Mise en service 75
Gabarit d'un devis de performance pour système géothermique 76
Renseignements importants à obtenir des fournisseurs et entrepreneurs . 78

ANNEXES
Annexe A : Études de cas 80
Annexe B : Ressources 85
Annexe C : Glossaire 88
Annexe D : Tableau de conversion 97
Sondage 99

103-04911/

PARTIE 1

SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES – NOTIONS DE BASE

Chapitre 1 : Introduction

Historique

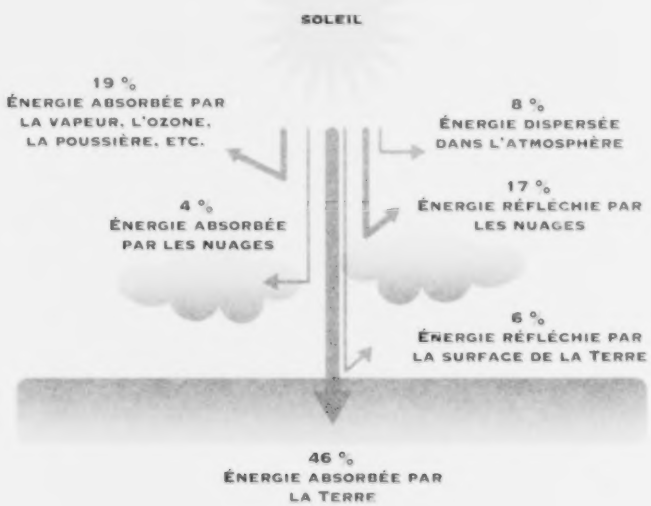
Le système géothermique puisant l'énergie du sol (également appelé « système à énergie du sol ») est un type de système à pompe à chaleur qui puise l'énergie du sol ou de l'eau souterraine. Ses plus anciennes applications remontent à 1912, quand le premier brevet de système recourant à une boucle souterraine a été déposé en Suisse. Toutefois, il a fallu attendre les années 1970 avant que de tels systèmes soient largement acceptés sur le marché. Les premiers systèmes géothermiques commerciaux ont été conçus pour le secteur résidentiel et ils puisaient l'eau souterraine. Au milieu des années 1980, des améliorations du rendement et des plages de fonctionnement des pompes à chaleur, combinées à de meilleurs matériaux pour les boucles souterraines, ont permis aux systèmes géothermiques de faire leur entrée sur le marché. À la même époque, des applications de type commercial ont commencé à devenir populaires. Aujourd'hui, il se vend plus de 40 000 pompes à chaleur tous les ans en Amérique du Nord. La plus grande installation commerciale à ce jour (un système à eau souterraine) a une puissance de refroidissement totale qui dépasse 15 800 kW, ce qui démontre clairement que les systèmes géothermiques ne se limitent pas à des applications à petite échelle.

Les termes pour décrire les système géothermiques

Les systèmes géothermiques sont connus sous plusieurs termes différents. Voici les termes les plus courants :

- Pompes à chaleur géothermiques
- Systèmes GeoExchange™
- Énergie du sol
- Géothermopompes
- Systèmes à boucle de sol (à boucle fermée horizontale ou verticale)
- Systèmes à eau souterraine (à boucle ouverte)
- Systèmes à eau de surface (étang, lac, océan)

FIGURE 1. VENTILATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE



QU'EST-CE QU'UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE?

Le système géothermique utilise une technologie de chauffage et de refroidissement qui transfère de la chaleur provenant du sol ou de l'eau afin de conditionner des locaux; il affiche un rendement énergétique supérieur à celui des systèmes classiques. On peut également se servir des systèmes géothermiques pour chauffer l'eau chaude sanitaire.

La chaleur naturelle du sol ou de l'eau est absorbée par un fluide caloporteur. Elle est transportée par un réseau de tuyaux enfouis dans la terre jusqu'à un bâtiment où, en mode chauffage, elle est amenée à la température voulue par une pompe à chaleur. La chaleur est alors acheminée par des conduits d'air ou par un réseau de tuyauterie d'eau chaude. En mode refroidissement, le fonctionnement du système est inversé et la chaleur excédentaire du bâtiment est évacuée dans le sol frais.

Comme la pompe à chaleur classique, la pompe à chaleur d'un système géothermique est foncièrement un conditionneur d'air qui peut fonctionner en sens inverse en hiver. Toutefois, contrairement aux pompes à chaleur à air classiques, les systèmes géothermiques peuvent maintenir un rendement et une puissance élevés, même lorsque la température de l'air ambiant atteint des valeurs extrêmes en hiver ou en été, car leurs composants ne sont pas exposés à l'air extérieur.

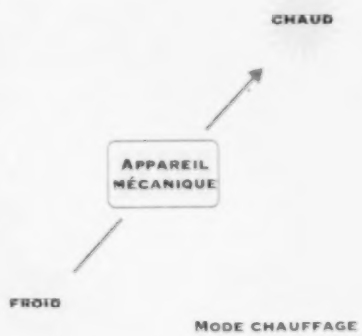
Beaucoup de systèmes géothermiques sur le marché peuvent chauffer l'eau chaude sanitaire au moyen d'un dispositif appelé désurchauffeur, ce qui accroît leur rendement. Ils peuvent également procurer de l'eau chaude sanitaire à l'aide d'une pompe à chaleur eau-eau.

L'utilisation des systèmes géothermiques peut conduire à d'importantes économies d'énergie. Par comparaison avec les systèmes classiques, on peut réduire la consommation d'énergie de l'ordre de 30 à 70 p. 100 en mode chauffage, et de 20 à 95 p. 100 en mode refroidissement.

Les systèmes géothermiques sont offerts en une vaste gamme de configurations qui font appel au sol, à l'eau souterraine ou à l'eau de surface comme source et puits de chaleur. En voici des exemples :

- les systèmes à boucle de sol qui utilisent le sol comme source et puits de chaleur grâce à des boucles souterraines verticales ou horizontales;
- les systèmes à eau souterraine qui exploitent l'énergie de l'eau souterraine (aquifères);
- les systèmes à eau de surface qui utilisent les plans d'eau (lacs, étangs, etc.) comme source et puits de chaleur.

FIGURE 2. PRINCIPE DE BASE DE LA POMPE À CHALEUR



PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE LA POMPE À CHALEUR

La chaleur passe naturellement des milieux à température élevée aux milieux à température plus basse. La pompe à chaleur (ou « thermopompe ») est un appareil qui transmet la chaleur dans le sens contraire, soit vers un milieu à température plus élevée. Vu qu'il faut effectuer du travail pour y parvenir, l'expression « pompe » à chaleur a été utilisée pour décrire l'appareil.

Les pompes à chaleur qui font partie d'un système géothermique fonctionnent selon les mêmes principes de base que ceux de la plupart des appareils de chauffage et de refroidissement. La majorité de ces systèmes sont basés sur deux phénomènes physiques :

- quand un liquide s'évapore, il absorbe de l'énergie, et quand il se condense, il dégage de l'énergie;
- tout liquide s'évapore ou se condense à une température plus basse quand la pression diminue, et se condense ou s'évapore à une température plus élevée quand la pression augmente.

Ces deux principes sont à la base du cycle de compression de vapeur, qu'on retrouve dans la plupart des pompes à chaleur des systèmes géothermiques. Ce cycle utilise les deux principes en question pour transférer l'énergie d'un milieu froid à un milieu plus chaud.

Par conséquent, la pompe à chaleur n'est rien d'autre qu'un appareil de réfrigération. Ce qui la distingue des appareils de réfrigération classiques, ce sont ses températures de fonctionnement, et le fait qu'elle est réversible et peut ainsi procurer soit du chauffage soit du refroidissement.

Les bonnes conditions

Voici les bâtiments commerciaux et institutionnels qui conviennent le mieux aux systèmes géothermiques :

- les bâtiments neufs, qui s'adaptent mieux à la conception d'un système. Il existe également un certain nombre d'applications où des rénovations importantes sont entreprises ou des rajouts sont construits et où l'on peut envisager l'installation d'un système géothermique;
- des bâtiments qui exigent beaucoup d'énergie pour chauffer les locaux et l'eau. Les établissements de soins prolongés, les maisons de retraite et les établissements de soins de santé constituent d'excellents candidats;
- les bâtiments situés dans des régions où l'on ne peut s'approvisionner en gaz naturel à des fins de chauffage;
- les bâtiments qui ont besoin à la fois de chauffage et de refroidissement à longueur d'année, ce qu'un système géothermique de distribution à deux tuyaux peut fournir;
- les bâtiments où il importe de maintenir un belle apparence extérieure, comme les bâtiments patrimoniaux rénovés;
- les bâtiments où la grosseur d'une salle technique doit être gardée au minimum.

Fonctionnement des systèmes géothermiques

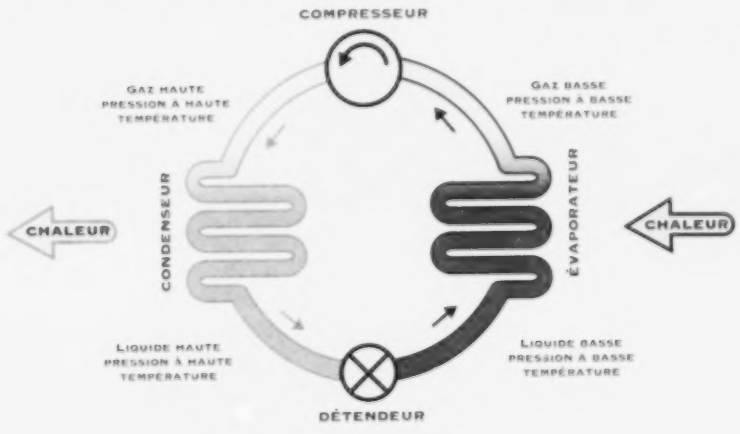
Principe de base

La chaleur est présente même à très basse température. Si la température d'un objet est au-dessus du zéro absolu (–273 °C), cet objet renferme de l'énergie calorifique. La température du sol est trop basse pour chauffer un immeuble directement (au Canada, elle est de 4 à 10 °C), mais le sol renferme tout de même une grande quantité de chaleur. Il faut une pompe à chaleur pour concentrer cette énergie extraite du sol à un niveau acceptable pour le chauffage, ou pour évacuer la chaleur dans le sol de manière efficace. La source ou puits de chaleur souterrain (sol ou eau) possède une température presque constante, ce qui convient bien à l'usage d'une pompe à chaleur, en donnant un rendement prévisible et des contraintes thermiques et mécaniques réduites. Un système géothermique peut procurer le chauffage et le refroidissement des locaux de la plupart des bâtiments institutionnels ou commerciaux et répondre à une grande partie de leurs besoins en eau chaude.

Aperçu du cycle de réfrigération

La grande majorité des pompes à chaleur fonctionnent selon le principe du cycle de compression de vapeur. Les composants principaux d'un tel système sont le compresseur, la soupape de détente et deux échangeurs thermiques appelés l'évaporateur et le condenseur. Les composants sont raccordés pour former un circuit fermé, comme l'illustre la figure 3. Un fluide, appelé caloporteur ou frigorigène, circule à travers les quatre composants.

Figure 3. Cycle de réfrigération (mode chauffage)



EXCAVATION D'UNE TRANCHÉE POUR Y DÉPOSER DES BOUCLES SOUTERRAINES

Dans l'évaporateur, le frigorigène entre à une température froide, surtout sous forme liquide. Le liquide est plus froid que la source de chaleur, par exemple le sol environnant en mode chauffage d'un système géothermique, ou encore l'air de la pièce en mode refroidissement. La température plus élevée du sol ou de l'air du bâtiment fait en sorte que le frigorigène s'évapore, absorbant ainsi de la chaleur. La vapeur du frigorigène provenant de l'évaporateur se rend jusqu'au compresseur, où elle est comprimée à une pression et à une température supérieures. Dès qu'il passe dans le compresseur, on dit que le frigorigène est du côté « haute pression » du système. Puis, la vapeur très chaude entre dans le condenseur, où elle se condense et dégage de la chaleur (elle chauffe le bâtiment en mode chauffage). Enfin, la pression du liquide frigorigène chaud qui sort du condenseur est réduite dans la soupape de détente. Le processus de détente réduit également la température du frigorigène avant que celui-ci n'entre de nouveau dans l'évaporateur. Ce processus peut être inversé pour refroidir le bâtiment.

Composants des systèmes géothermiques

La fonction essentielle d'un système géothermique est de procurer du chauffage et du refroidissement à un bâtiment. En outre, il peut procurer de l'eau chaude, parfois avec un chauffe-eau classique en appoint. Pour y parvenir, les systèmes se composent des trois sous-systèmes principaux suivants (que nous expliquerons plus en détail au chapitre 2, « Le choix d'un système géothermique ») :

- une boucle souterraine (également appelée échangeur souterrain) qui extrait la chaleur du sol ou y évacue la chaleur du bâtiment;
- une pompe à chaleur qui transfère la chaleur entre le système de distribution et les boucles souterraines;
- un système de distribution qui achemine la chaleur ou le froid aux divers locaux d'un bâtiment.

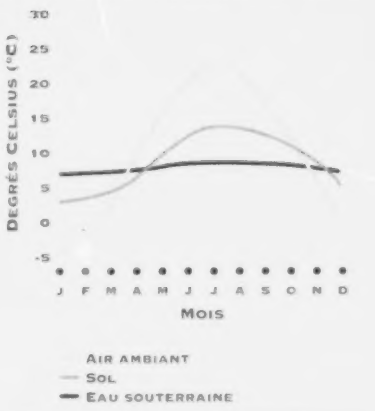
Avantages des systèmes géothermiques

Les systèmes géothermiques offrent de nombreux avantages aux propriétaires et locataires d'immeubles, dont beaucoup contribuent à réduire les frais de propriété et de fonctionnement.

Température du sol constante

À une profondeur de 8 ou 9 mètres et plus, la température du sol est pratiquement constante toute l'année – elle se rapproche de la moyenne annuelle de la température de l'air extérieur. Cette stabilité permet aux pompes à chaleur géothermiques d'afficher un rendement uniforme, peu importe la température de l'air extérieur. Dans des climats ayant de grandes fluctuations de température comme au Canada, cela est très avantageux. L'énergie du sol peut jouer un rôle important dans la réponse du Canada face aux changements climatiques – tant comme forme d'énergie renouvelable que de technologie éconergétique – en permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Figure 4. Température mensuelle moyenne au Canada



Énergie renouvelable

Les systèmes géothermiques sont écologiques et exploitent une forme d'énergie renouvelable. Comme la plupart des systèmes à énergie renouvelable, ils font appel à l'énergie solaire. En effet, environ les deux tiers de l'énergie qu'ils procurent provient indirectement du soleil. Elle est stockée dans la croûte terrestre – la Terre absorbe 46 p. 100 de l'énergie du soleil qui s'y rend, montant qui représente plus de 500 fois la quantité d'énergie requise par la population de la planète. Les systèmes géothermiques peuvent extraire une partie de l'énergie stockée dans le sol pour chauffer les bâtiments en hiver et, en été, inverser le processus pour rejeter la chaleur excédentaire des bâtiments dans le sol pour conditionner l'air. Une analyse récente dans le cadre d'une étude sur le changement climatique indiquait que les systèmes géothermiques produisaient moins d'émissions de GES que les autres types de systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement de l'air (CVC) de bâtiments commerciaux et institutionnels.

Souplesse

Un système géothermique décentralisé possède une souplesse intégrée qui permet d'installer les pompes à chaleur uniquement lorsque l'emménagement des locaux est imminent. Les locataires peuvent régler les niveaux de confort, et la commande thermostatique est simple à utiliser. Les pompes à chaleur peuvent être situées en dehors des locaux occupés (dans le plafond des couloirs, par exemple). Cela donne une certaine flexibilité pour cloisonner les locaux occupés, et il est facile d'agrandir les locaux au besoin. En planifiant bien, les propriétaires et les ingénieurs d'études intégreront à la fois souplesse et rentabilité dans les systèmes.

Avantages des systèmes géothermiques de bâtiments commerciaux :

- coût global sur le cycle de vie plus bas
- coût initial plus bas (parfois)
- coûts de fonctionnement et d'entretien plus bas
- confort amélioré (réglage de la température dans chaque pièce)
- petite salle technique
- apparence du bâtiment (aucune pénétration de toit)
- exigences de hauteur du bâtiment plus faibles (parfois)

Espace et économies de coût

Le système peut être entièrement électrique, ce qui élimine entre autre la nécessité d'avoir plusieurs raccordements aux services publics ou réservoirs de stockage de combustible. Il requiert une salle de mécanique moins grande que celle des systèmes centraux de chauffage et de refroidissement, ce qui signifie plus d'espace dans les secteurs occupés et loués, et peut-être des hauteurs de plafond moindres. On y retrouve beaucoup moins d'appareils à l'extérieur, ce qui coûte moins cher en frais d'entretien et de sécurité. Sans appareils extérieurs sur le toit, on a moins de pénétrations, de plates-formes d'entretien et d'écrans architecturaux, et on a moins besoin de protéger les appareils du vandalisme. Le bruit extérieur est grandement réduit, et l'apparence du bâtiment est plus agréable. De plus, les composants de systèmes géothermiques possèdent une plus longue vie utile, par exemple plus de 30 ans pour les boucles souterraines, et 20 ans en général pour les pompes à chaleur.

Figure 5. Avantages des systèmes géothermiques

Efficacité énergétique et avantages environnementaux

Les systèmes géothermiques sont écologiques :

- peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre (liés au changement climatique)

Vu que les systèmes géothermiques sont basés sur le transfert de la chaleur naturelle et qu'ils ne produisent aucune combustion, les seules émissions nocives pour l'environnement attribuables à leur utilisation sont liées à l'électricité qu'ils consomment, si cette électricité est produite à partir de combustibles fossiles. Ces systèmes sont également éconergétiques, car ils transfèrent (sous forme de chaleur) trois ou quatre fois la quantité d'énergie qu'ils consomment (en électricité). Par conséquent, leur utilisation peut contribuer de façon importante à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre – qui ont un effet sur le changement climatique –, puisque peu ou pas d'émissions de dioxyde de carbone y sont associées.

Avantages pour la société

Le recours aux systèmes géothermiques a un impact positif sur la société dans son ensemble, car ils dépendent surtout d'énergie renouvelable, ont une longue durée de vie et se composent d'appareils recyclables. La ressource est abondante et peut être utilisée sur place. Le choix d'un système à énergie du sol devrait toujours faire partie d'une approche intégrée en conception de bâtiment.

Rentabilité

En général, les coûts d'installation d'un système géothermique sont supérieurs à ceux d'un système de CVC classique, mais ils peuvent rapporter des économies de dépenses énergétiques annuelles très importantes. Des coûts d'entretien inférieurs et l'élimination des coûts de combustible des systèmes classiques à la faveur d'une source de chaleur naturelle gratuite provenant de la terre ou de l'eau, de même que la durée de vie supérieure des appareils, donnent à ces systèmes un coût global inférieur sur le cycle de vie.

Les systèmes géothermiques sont rentables :

- appel de puissance plus faible
- source de chaleur stable, sécuritaire
- plus faible utilisation des ressources
- entretien moindre, rentabilité accrue
- moins soumis aux fluctuations des prix de l'énergie
- coût initial parfois plus bas que celui des systèmes classiques

Le coût initial d'un système géothermique n'est pas toujours supérieur à celui d'un système de CVC classique, car les coûts des refroidisseurs, des chaudières et des tours de refroidissement, qui font partie des systèmes classiques, sont éliminés. Les coûts liés à la boucle souterraine et aux composants de la pompe à chaleur d'un système géothermique doivent être pondérés par rapport aux coûts des appareils des autres types de systèmes.

Coût des systèmes géothermiques

Coût d'immobilisations

Le coût d'immobilisations des systèmes géothermiques est en général supérieur à celui des systèmes classiques, mais cela est compensé par des coûts de fonctionnement et d'entretien inférieurs.

De plus, les systèmes géothermiques entrainent une demande réduite d'électricité pour le bâtiment, ce qui limite les frais d'installation et les coûts des appareils électriques. Comparativement à un système de chauffage électrique, les économies sont encore plus grandes. Le coût supplémentaire d'un système géothermique varie considérablement selon l'emplacement, le type de bâtiment, les dimensions et le coût du système qui serait installé à sa place. D'après un échantillon de neuf bâtiments commerciaux équipés d'un système géothermique, le coût moyen des immobilisations était de 105 $/m^2, contre 89 $/m^2 pour un système classique (soit environ 18 p. 100 de plus). Souvent, plus le projet prend de l'envergure, plus le coût supplémentaire du système géothermique est réduit. En fin de compte, il faut évaluer avec soin le coût des immobilisations de chaque projet.

Coût de fonctionnement

Les économies du coût de l'énergie qu'offre un système puisant l'énergie du sol compensent les coûts des immobilisations accrus. Ces économies peuvent être importantes, voire jusqu'à 60 p. 100. Plus la fraction des coûts de l'énergie attribuable au chauffage et au refroidissement du bâtiment est élevée, plus un tel système peut permettre de réduire les coûts de l'énergie. On peut réduire la demande de pointe jusqu'à 35 p. 100.

Comme les écarts du coût des immobilisations, les économies varient beaucoup selon le projet et son emplacement, et il faut bien évaluer ces facteurs à l'avance. Le coût de fonctionnement est particulier à l'emplacement et à l'utilisation du système; votre équipe de conception devrait réaliser une analyse complète comprenant la ventilation des coûts et une analyse de sensibilité.

Coûts d'entretien

En plus des économies sur les coûts de l'énergie, il est prouvé que les systèmes géothermiques peuvent également faire économiser en termes d'entretien. Lorsqu'on fait appel à la main-d'œuvre interne, le coût d'entretien moyen habituel d'un système à boucle de sol est de 0,95 $/m^2 par an, contre 2,33 $/m^2 par an dans le cas d'un système à eau souterraine. D'autres économies peuvent être intégrées au coût d'entretien. Votre équipe de conception devrait être en mesure d'offrir une analyse complète, sur demande.

Financement des systèmes géothermiques

Voici une liste des modes de financement visant à compenser le coût initial parfois élevé d'un système géothermique :

- **prêt standard** d'une institution financière pour défrayer le coût initial du système, moins le versement initial;
- **prêt standard** comportant une clause d'économies partagées. Il s'agit d'un prêt pour défrayer le coût initial du système, en vertu duquel le client verse des frais mensuels fixes pendant une période définie. Un intermédiaire financier couvre l'ensemble des coûts de fonctionnement et d'entretien pendant la période définie;
- **crédit-bail**, par lequel le client défraie tant le coût de l'équipement que les frais d'entretien par de versements périodiques tout en assumant lui-même les coûts de fonctionnement;
- **tarification de l'utilisation finale**, par laquelle le client assume le coût de l'équipement, de l'entretien et du fonctionnement par des versements fixes sur une période prescrite;
- **impartition économie**, où un tiers assume le coût de l'équipement, de l'entretien et du fonctionnement moyennant un remboursement lié aux économies d'énergie.

Ces modes de financement sont offerts par des banques, des institutions financières, des services publics et des tierces parties.

Période de récupération et analyse des coûts sur le cycle de vie

L'analyse de cycle de vie permet de choisir parmi des options concurrentes. L'investissement qui représente le plus bas coût global sur le cycle de vie (CCV) tout en répondant à l'objectif de l'investisseur devrait être

l'investissement privilégié. La méthode du CCV totalise le coût net du système géothermique et celui des autres options, de même que les coûts énergétiques et d'autres coûts de fonctionnement sur la vie utile du système. Le coût net comprend l'achat et l'installation, l'entretien, les réparations, le remplacement et tous les autres coûts attribuables au système. L'analyse du CCV donne un résultat économique plus représentatif que le calcul de la période de récupération simple, et intègre le concept du développement durable.

On peut déterminer, à l'aide du calcul de la période de récupération simple, la relation d'équilibre entre le coût des immobilisations et les économies de fonctionnement. Cet indicateur offre une évaluation de la durée nécessaire pour récupérer l'investissement initial.

La période de récupération simple liée à l'achat de systèmes géothermiques s'établit en général à 6 à 8 ans. Dans les faits, elle se situe entre la rentabilité immédiate (dans certains cas où le système géothermique coûte moins cher qu'un système classique) à un peu plus de 12 ans. Le taux de rendement interne moyen d'un système géothermique est d'environ 20 p. 100.

Par exemple, des études indiquent une période de récupération de 4 à 10 ans dans le cas d'une tour d'appartements en copropriété, comparativement à un scénario de référence faisant intervenir une chaudière à gaz ou un système à eau chaude. La longueur de la période dépend de l'emplacement, de l'utilisation et du scénario de référence.

Le logiciel RETScreen® de Ressources naturelles Canada peut faciliter l'analyse du coût global sur le cycle de vie dans le cadre d'une étude de préfaisabilité. Le tableau 1 indique les périodes de récupération obtenues lors d'une analyse type du CCV, quand on compare un système géothermique avec un système de référence au gaz naturel.

TABLEAU 1. PÉRIODES DE RÉCUPÉRATION POUR UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE (EN ANNÉES) RELATIVEMENT À UN SYSTÈME DE RÉFÉRENCE AU GAZ*

	Montréal	Toronto	Vancouver
Nouvelle école primaire (3 000 m²)	13,6	18,3	1,3
Complexe pour ainés (7 800 m²)	7,6	10,8	1,8
Installation de haute technologie (7 000 m²)	–	Immédiat	–
Aréna – curling-hockey (1 100 m²)	4,8	Immédiat	–
Hôtel de taille moyenne (10 500 m²)	5,9	9,5	6,1
Motel (2 050 m²)	5,4	8,3	5,7
Immeuble de bureaux de banlieue (5 200 m²)	Immédiat	Immédiat	Immédiat
Centre commercial linéaire	4,9	5,4	–

* Les résultats du coût sur le cycle de vie sont basés sur les prix de 1999. À mesure que le prix des combustibles monte, les périodes de récupération raccourcissent.

Le tableau 2 indique les périodes de récupération obtenues lors d'une analyse type du CCV, quand on compare un système géothermique avec un système de référence au mazout.

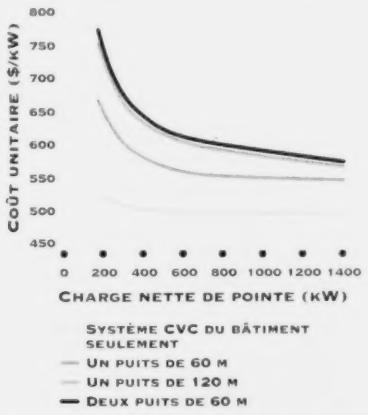
TABLEAU 2. PÉRIODES DE RÉCUPÉRATION POUR UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE (EN ANNÉES) RELATIVEMENT À UN SYSTÈME DE RÉFÉRENCE AU MAZOUT*

	Montréal	Toronto	Vancouver
Nouvelle école primaire (3 000 m²)	6,6	8,5	0,8
Complexe pour aînés (7 800 m²)	3,5	4,7	1,1
Installation de haute technologie (7 000 m²)	–	Immédiat	–
Aréna – curling-hockey (1 100 m²)	4,0	Immédiat	–
Hôtel de taille moyenne (10 500 m²)	2,8	4,2	3,6
Motel (2 050 m²)	2,7	4,0	3,5
Immeuble de bureaux de banlieue (5 200 m²)	Immédiat	Immédiat	Immédiat
Centre commercial linéaire	2,9	3,1	–

* Les résultats du coût sur le cycle de vie sont basés sur les prix de 1999. À mesure que le prix des combustibles monte, les périodes de récupération raccourcissent.

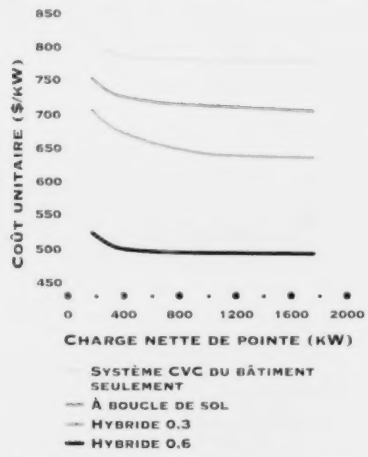
La rentabilité immédiate du système géothermique résulte du fait qu'il a un coût initial inférieur à celui de l'autre système. Il importe également de tenir compte des économies d'espace et de la complexité moindre du système de CVC qui en découle, qui peuvent engendrer des coûts initiaux plus bas, de même que des économies au chapitre de l'entretien, ce qui abaisse les coûts de fonctionnement.

FIGURE 6. COÛT TYPE D'UN SYSTÈME À EAU SOUTERRAINE



Source : Kavanaugh, S., *A Capital Cost Comparison of Commercial Ground-Source Heat Pump Systems*, 1994.

FIGURE 7. COÛT TYPE D'UN SYSTÈME À BOUCLE DE SOL ET DE SYSTÈMES HYBRIDES



Source : Kavanaugh, S., *A Capital Cost Comparison of Commercial Ground-Source Heat Pump Systems*, 1994.

RÈGLES APPROXIMATIVES CONCERNANT LES COÛTS

Des études sur divers types de systèmes géothermiques indiquent que ceux à boucles souterraines verticales entraînent habituellement le coût initial le plus élevé, par comparaison avec les systèmes à eau souterraine ou hybrides. On peut atteindre des réductions de coût de l'ordre de 20 à 80 p. 100 en utilisant ces deux dernières options, dans certaines conditions. En général, les systèmes à eau souterraine ont un coût initial beaucoup plus bas, mais ils sont soumis à des règlements plus sévères et à des contraintes pratiques en ce qui concerne l'utilisation et l'évacuation des eaux. De plus, le rendement global et les avantages économiques à long terme des systèmes à eau souterraine peuvent être moins attrayants que ceux à boucle de sol ou des systèmes hybrides, à cause de leur appel de puissance de pompage.

Le coût total d'un système à eau souterraine dépend de la température de l'eau, des dimensions du système et de la profondeur des puits, comme l'illustre la figure 6. On constate une augmentation rapide du coût unitaire des systèmes à eau souterraine lorsque leur taille diminue. Cette augmentation n'est pas aussi prononcée dans le cas des systèmes à boucle de sol et des systèmes hybrides.

En général, quand la profondeur du trou de forage (vertical) requis pour le refroidissement dépasse celle associée au chauffage, le choix d'un système hybride réduit le coût initial sans que le rendement n'en souffre beaucoup. Plus le ratio entre la longueur requise pour le chauffage et celle pour le refroidissement est bas, plus le coût initial d'un système hybride sera avantageux, comme l'illustre la figure 7.

Chapitre 2 : Le choix d'un système géothermique

Choix d'un type de système

Le choix du système géothermique le plus rentable doit tenir compte de bien des facteurs, quoique certains principes généraux puissent faciliter la planification. Il faut considérer chacun des trois sous-systèmes principaux (la boucle souterraine, les pompes à chaleur et le système de distribution).

Boucle souterraine

Le système géothermique peut faire appel soit au sol soit à l'eau comme source et puits de chaleur. Dans les systèmes à boucle de sol, une série de tuyaux enfouis transportent un fluide caloporteur qui est souvent une solution antigel. En revanche, les systèmes à eau souterraine utilisent habituellement des puits à partir desquels l'eau est pompée soit directement vers l'échangeur de chaleur eau-frigorigène de la pompe à chaleur ou, habituellement, vers un échangeur de chaleur intermédiaire relié à la boucle de distribution du bâtiment. Cette dernière configuration facilite le nettoyage en réduisant l'encrassement des composants de la pompe à chaleur, permet la récupération de chaleur entre les pompes à chaleur dans les systèmes multizones et réduit la charge de pompage des puits.

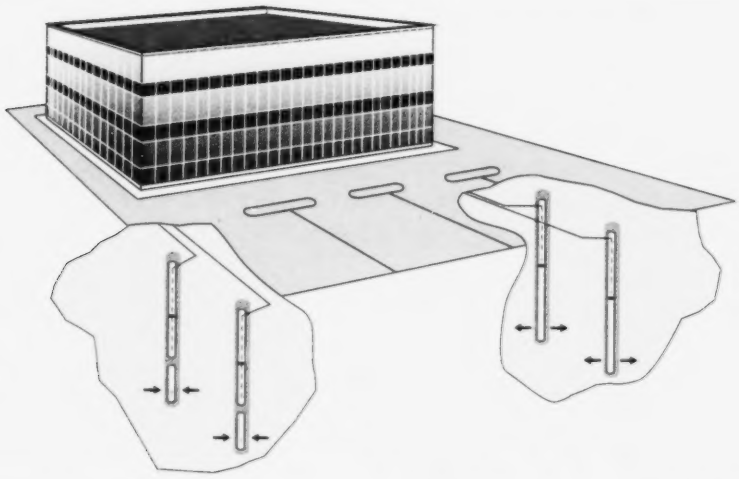
Il existe une grande variété de boucles souterraines. Voici un aperçu des types les plus courants.

Systèmes à eau souterraine

Quand l'eau de la nappe phréatique est disponible en quantité suffisante, que sa qualité se prête à ce type d'installation et que les règlements environnementaux le permettent, cette option est à considérer. Les systèmes de ce type sont habituellement plus économiques dans le cas des grands bâtiments, vu que le coût des puits (d'alimentation et d'injection) est proportionnellement moins élevé pour de grandes capacités.

Les systèmes à eau souterraine ont été les premiers à apparaître sur le marché, et ils donnent de bons résultats depuis des décennies. Toutefois, les règlements sur l'environnement et la disponibilité insuffisante de l'eau peuvent limiter leur utilisation dans certaines régions. Leur boucle souterraine compte simplement un aquifère à partir duquel l'eau est pompée directement vers le bâtiment et, habituellement, d'un deuxième puits par lequel l'eau est retournée à l'aquifère. Dans de tels cas, les puits d'alimentation et de retour doivent être espacés pour éviter le mélange de l'eau d'alimentation et de l'eau de retour. Comme il a été décrit plus haut, un échangeur de chaleur intermédiaire peut être utilisé pour isoler les pompes à chaleur de l'eau du puits, afin de les protéger de l'encrassement,

FIGURE 8. SYSTÈME À EAU SOUTERRAINE



de l'abrasion ou de la corrosion. Après avoir quitté le bâtiment, l'eau peut être retournée au même aquifère par le second puits, appelé puits d'injection. La puissance de pompage nécessaire est souvent un facteur important dont il faut tenir compte quand on évalue les systèmes à eau souterraine.

Systèmes à boucle verticale

Les systèmes à boucle verticale conviennent bien à la plupart des bâtiments commerciaux, et sont habituellement l'option à boucle de sol la moins coûteuse pour les grands bâtiments. La boucle souterraine

FIGURE 9. SYSTÈME À BOUCLE VERTICALE

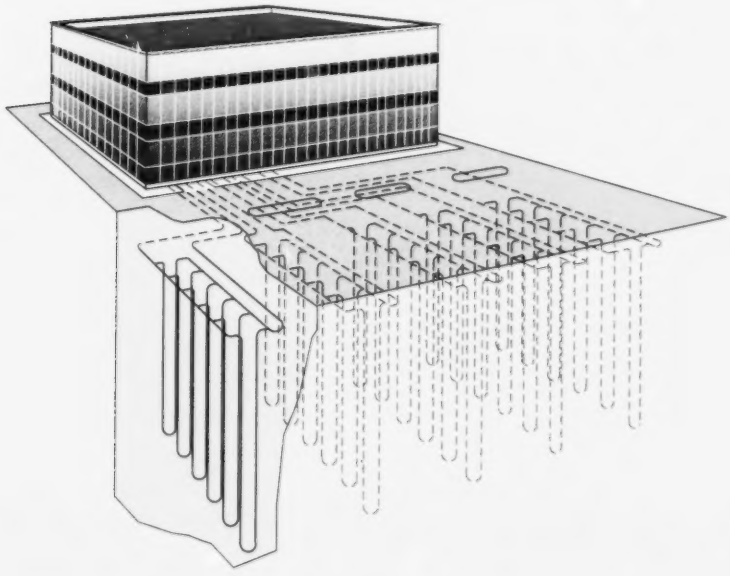
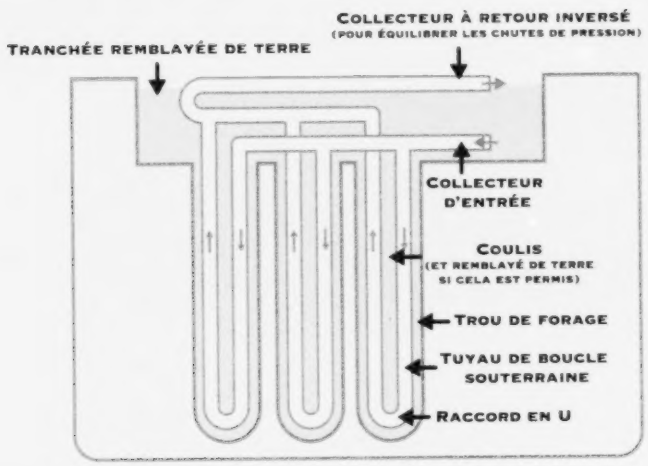


FIGURE 10. BOUCLE SOUTERRAINE VERTICALE



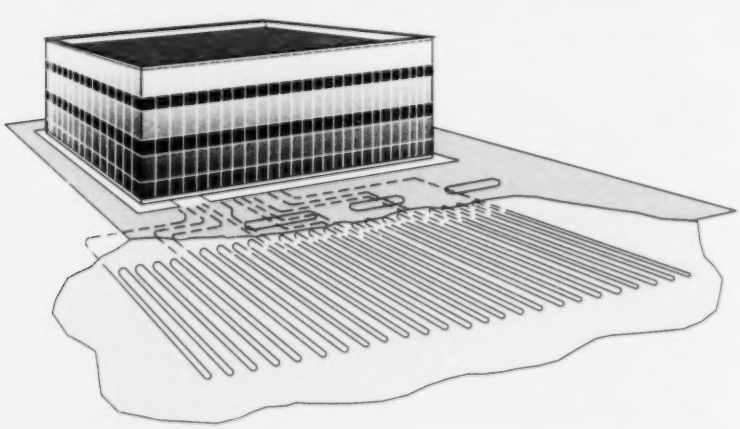
peut être située sous le carré du bâtiment ou sous le terrain de stationnement, rendant ainsi optimale l'utilisation du sol. Ces systèmes ont très peu d'impact sur l'environnement, et leur boucle souterraine peut également être utilisée, lorsqu'elle est bien conçue, pour le stockage d'énergie (par exemple, pour du refroidissement gratuit et parfois, du chauffage gratuit).

Ce type de système convient bien à la plupart des sols et lorsqu'on vise un effet minimal sur l'aménagement paysager. Il consiste en une série de trous verticaux (trous de forage) de 45 à 150 mètres de profondeur dans le sol, dans lesquels on dispose un ou deux tuyaux en U de polyéthylène haute densité (un doublet composé d'une conduite descendante et une conduite ascendante dans le même trou). Après l'insertion des tuyaux, le trou est rempli de remblai et de coulis. L'injection de coulis consiste à remplir le trou de forage d'un matériau spécial qui empêche l'eau de surface de pénétrer dans la nappe phréatique, ou qui empêche l'eau d'un aquifère de s'écouler dans un aquifère contigu. Habituellement, les matériaux de coulis transfèrent la chaleur moins bien que le remblai habituel et coûtent plus cher, mais on peut également se procurer du coulis à plus grande conductivité thermique (p. ex., la bentonite). L'injection de coulis pour remplir complètement les trous de forage est souvent recommandée pour assurer une protection adéquate contre l'écoulement d'eau d'un aquifère à un autre. Dans tous les cas, on doit consulter les règlements locaux. Après la pose de remblai et de coulis, les tuyaux verticaux sont reliés à un tuyau collecteur horizontal souterrain. Le tuyau collecteur transporte le liquide caloporteur dans les deux sens entre la boucle souterraine et les pompes à chaleur. Les boucles verticales sont en général plus coûteuses à installer que les boucles horizontales (pour les petits projets), mais elles nécessitent une plus faible longueur de tuyaux en raison du rendement thermique plus élevé obtenu à des profondeurs plus grandes.

Systèmes à boucle horizontale

Les systèmes à boucle fermée horizontale sont souvent les plus économiques à installer, à cause de leur coût initial plus bas. Toutefois, ils affichent souvent des rendements saisonniers inférieurs à cause des températures souterraines plus basses, et nécessitent une plus grande surface de terrain. En général, lorsque la puissance de refroidissement du système dépasse 70 kW, la surface d'un terrain de stationnement typique ne suffit pas à accueillir la boucle souterraine s'il n'y a pas un deuxième moyen d'évacuer la chaleur. Pour ces raisons, les systèmes à boucle horizontale conviennent mieux à de plus petites applications, comme les habitations et les petits bâtiments commerciaux. Les déséquilibres entre les charges de chauffage et de refroidissement doivent être surveillés de près dans ces systèmes pour assurer une stabilité thermique suffisante du sol qui permettra d'exploiter l'énergie du sol à long terme.

FIGURE 11. SYSTÈME À BOUCLE HORIZONTALE



Le déséquilibre thermique

Toute l'information contenue dans le présent guide suppose que la boucle souterraine sera soumise à peu près à la même température au fil des ans. Ce sera le cas pour tous les systèmes bien conçus. Toutefois, si la charge de refroidissement du bâtiment diffère beaucoup de sa charge de chauffage, le sol subira soit un gain soit une perte d'énergie nette importante. Voilà ce que l'on appelle le « déséquilibre thermique ». Dans le premier cas (gain énergétique), la température du sol peut augmenter avec les années, si la boucle n'a pas été bien conçue (p. ex., sol comportant peu de circulation d'eau et trous de forage très peu éloignés l'un de l'autre). Dans le second cas, la température moyenne du sol baissera graduellement. Lors de la conception d'un échangeur souterrain, il faut toujours tenir compte du déséquilibre thermique dans la conception finale pour maintenir les rendements à long terme.

Superficie de terrain requise

La superficie du terrain n'est pas habituellement un facteur critique dans le cas d'un système à eau souterraine. On peut en faire l'estimation en s'appuyant sur un rayon de 6 m par puits, y compris les puits d'injection.

La superficie de terrain des systèmes à boucle fermée verticale peut être basée sur une profondeur moyenne des trous de forage de 91 m, et d'un espacement de 5 m entre ces trous. La superficie de terrain nécessaire peut varier énormément, mais elle est habituellement de 5 à 10 m^2/kW.

Les systèmes à boucle horizontale exigent un terrain plus grand. La superficie requise varie selon la disposition de la boucle et des tuyaux requis pour minimiser la puissance de pompage. Voici des valeurs types de superficie du terrain :

TABLEAU 3. SUPERFICIE DE TERRAIN TYPE POUR UNE BOUCLE HORIZONTALE (EN M^2/KW)

Configuration	Régions à climat froid d'Amérique du Nord	Régions à climat tempéré d'Amérique du Nord
Un tuyau	79	79
Deux tuyaux	53	93
Quatre tuyaux	40	66
Six tuyaux	40	66

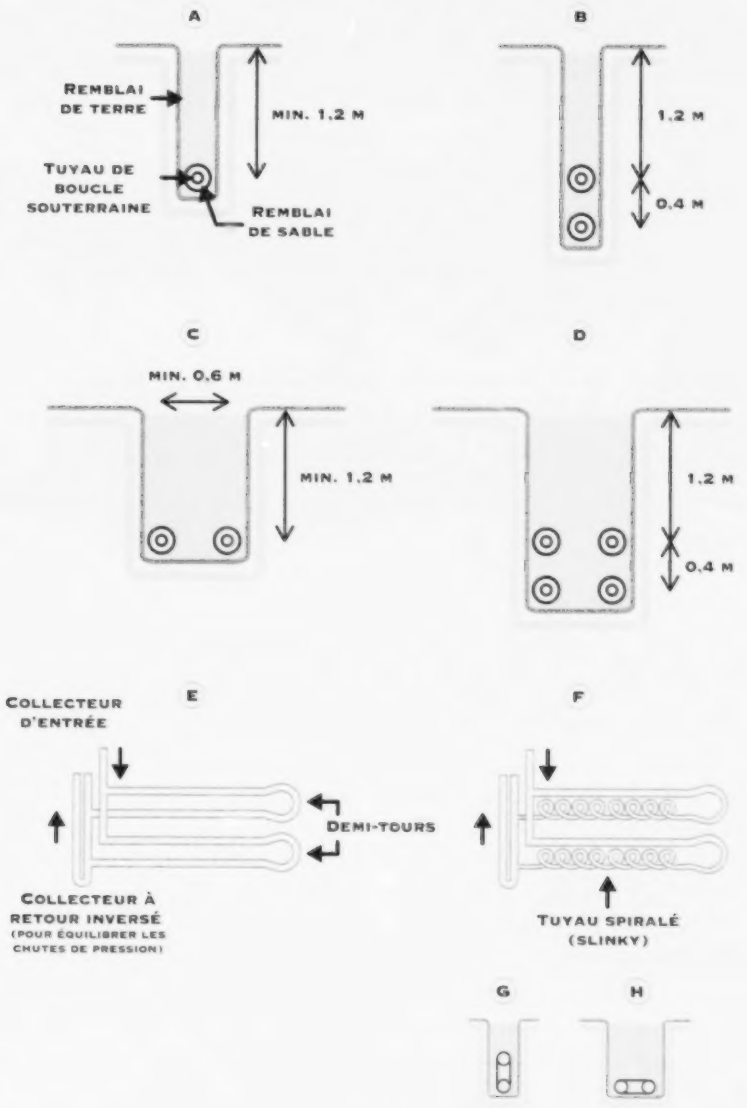
Source : *Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 1995.

Les boucles souterraines horizontales consistent en une série de tuyaux disposés dans des tranchées, habituellement à un ou deux mètres sous la surface du sol. On peut prévoir jusqu'à six tuyaux par tranchée, en autant qu'il y ait un espace suffisant entre les tuyaux. D'habitude, on installe 35 à 55 m de tuyau par kW de puissance de chauffage et de refroidissement. On peut aussi utiliser beaucoup de variantes des boucles horizontales. Si la surface du terrain est limitée, on peut choisir un tuyau en spirale pour poser davantage de tuyau dans la tranchée. Bien que cela réduise la superficie du terrain utilisée, il faut une plus grande longueur de tuyau, ce qui entraîne un coût additionnel. Après la pose des tuyaux, le remblai est versé dans la tranchée.

Systèmes à détente directe

Les systèmes décrits jusqu'ici font appel à un fluide intermédiaire pour transférer la chaleur entre le sol et le frigorigène de la pompe à chaleur. L'utilisation d'un fluide intermédiaire nécessite un taux de compression plus élevé dans la pompe à chaleur afin d'atteindre des écarts de température suffisants dans la chaîne de transfert de chaleur (du frigorigène au fluide intermédiaire au sol). De plus, ces systèmes exigent une pompe pour faire circuler l'eau entre la pompe à chaleur et la boucle souterraine. Par contraste, les systèmes à détente directe fonctionnent sans fluide intermédiaire, sans échangeur de chaleur fluide-frigorigène et sans pompe de circulation. Des serpentins en cuivre sont disposés sous la terre afin d'obtenir un échange direct de chaleur entre le frigorigène

FIGURE 12. DIVERS TYPES DE BOUCLES HORIZONTALES



A. UN SEUL TUYAU
B. DEUX TUYAUX SUPERPOSÉS (REMBLAI SABLEUX REQUIS SEULEMENT SI LES CAILLOUX MESURENT PLUS DE 5 CM DE DIAMÈTRE)
C. DEUX TUYAUX EN PARALLÈLE
D. QUATRE TUYAUX EN PARALLÈLE SUPERPOSÉS
E. SCHÉMA DE DEUX TUYAUX EN PARALLÈLE ACCOMPAGNÉS DES DEMI-TOURS ET DU COLLECTEUR
F. TUYAU SPIRALÉ DISPOSÉ À L'HORIZONTALE DANS UNE GRANDE TRANCHÉE OU À LA VERTICALE DANS UNE TRANCHÉE ÉTROITE
G. TUYAU SPIRALÉ DISPOSÉ À LA VERTICALE DANS UNE TRANCHÉE ÉTROITE
H. TUYAU SPIRALÉ DISPOSÉ À L'HORIZONTALE DANS UNE GRANDE TRANCHÉE

et le sol. Il en résulte une amélioration du transfert de chaleur et un plus grand rendement thermodynamique. Toutefois, les systèmes à détente directe exigent une grande quantité de frigorigène et, du fait que le sol est soumis à de plus grands écarts de température, il faut tenir compte d'autres éléments lors de la conception. Pour le chauffage en hiver, la température plus basse des serpentins souterrains peut amener l'humidité du sol à geler; les dépôts de glace peuvent faire bomber la terre. De plus, à cause de la possibilité de gel, il ne faudrait pas placer les serpentins près des conduites d'eau. Pour le refroidissement en été, les températures plus élevées des serpentins peuvent chasser l'humidité du sol.

Systèmes à eau de surface

Les systèmes géothermiques à eau de surface sont une option viable et relativement bon marché. Si un bâtiment est situé près d'un étang ou d'un lac, une série de tuyaux en serpentin submergés dans le plan d'eau constituera l'échangeur thermique extérieur. Ce genre de système nécessite peu de tuyaux et de forage, mais le plan d'eau doit être suffisamment profond et d'une assez grande surface. Le liquide est pompé dans un tuyau, tout comme dans un système à boucle de sol. Des boucles d'étang bien conçues entraînent peu d'impact sur l'écosystème aquatique. Près du rivage, il faut enfouir les tuyaux pour éviter qu'ils ne soient endommagés par la circulation des bateaux et la glace.

La présence d'entrepreneurs et d'installateurs locaux qui connaissent bien la technologie proposée est un autre facteur dont il faut tenir compte quand vient le temps de choisir un type de système géothermique. Le rendement à long terme aussi bien qu'un certain nombre de questions pratiques importantes relatives à la conception et à l'installation des systèmes peuvent habituellement être traités de façon très complète par des gens expérimentés.

Pompes à chaleur

Les pompes à chaleur constituent l'un des composants essentiels de tout système géothermique. On utilise dans ces systèmes des appareils eau-air ou eau-eau, selon le système de distribution de chaleur du bâtiment. Le type le plus couramment utilisé est la pompe à chaleur eau-air monobloc, qui a habituellement une puissance de refroidissement de 3,5 à 105 kW. En général, les systèmes géothermiques devraient comprendre des appareils à plage de température élargie, qui permettent une température d'admission (du liquide qui entre dans l'échangeur liquide intermédiaire-frigorigène) plus basse en mode chauffage et plus élevée en mode refroidissement. Dans ces appareils, tous les composants sont groupés dans un châssis unique. L'appareil comprend habituellement le compresseur, un échangeur de chaleur liquide-frigorigène, une unité

Figure 13. Pompe à chaleur

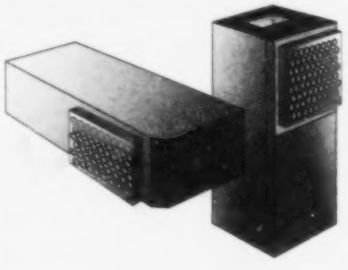
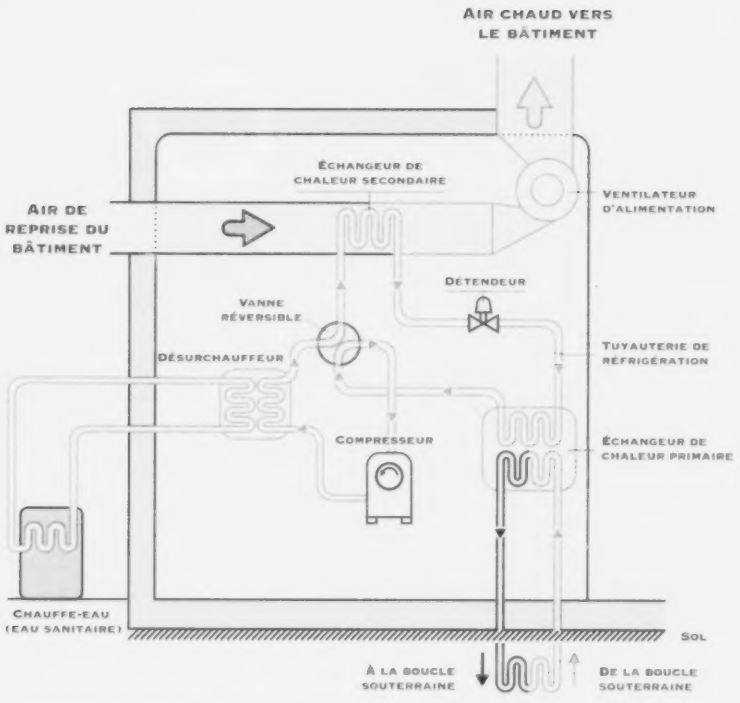


FIGURE 14. SCHÉMA SIMPLIFIÉ D'UNE POMPE À CHALEUR



de commande et un petit système de distribution d'air qui contient le ventilateur de conduit, le filtre, l'échangeur de chaleur frigorigène-air et un système pour enlever l'eau provenant de la condensation lors du refroidissement de l'air. Un schéma simplifié de pompe à chaleur monobloc est présenté ci-dessus.

Le désurchauffeur qui figure sur le schéma produit de l'eau chaude sanitaire quand le compresseur fonctionne. C'est un petit échangeur de chaleur auxiliaire à la sortie du compresseur. Il transfère la chaleur excédentaire du gaz comprimé vers une conduite d'eau qui l'achemine vers un réservoir d'eau chaude. Durant la saison de refroidissement, lorsque la climatisation fonctionne souvent, le désurchauffeur peut procurer toute l'eau chaude nécessaire pour certaines applications.

Au cours des dernières années, le marché des systèmes géothermiques a gagné en maturité, et les fabricants offrent désormais une vaste gamme de produits dont des systèmes bibloc, des pompes à chaleur eau-eau, des compresseurs à plusieurs vitesses et des compresseurs jumelés ainsi que des versions de toit de ces appareils pour répondre à diverses applications.

Voici quelques-unes des configurations typiques :

- appareils verticaux avec soufflage d'air vers le haut;
- appareils verticaux avec soufflage d'air vers le bas;
- appareils horizontaux pour plafonds;
- compresseurs jumelés;
- systèmes bibloc (groupe compresseur-échangeur de chaleur et unité de traitement de l'air distincts);
- appareils commerciaux de grande capacité, verticaux avec soufflage d'air vers le haut;
- appareils à deux vitesses, horizontaux ou verticaux;
- cabinets au plancher;
- appareils commerciaux de grande capacité, verticaux à débit d'air variable;
- unités de toit;
- systèmes de ventilation de salles de classe;
- pompes à chaleur eau-eau (systèmes de chauffage à eau chaude par rayonnement).

Des professionnels expérimentés et avisés sont en mesure de proposer une sélection adéquate de modèles de pompes à chaleur.

Tonnes, Btu/h et watts

On fait appel à différentes unités dans l'industrie pour mesurer la puissance de chauffage et de refroidissement des pompes à chaleur. En général, la puissance de refroidissement s'exprime en tonnes de réfrigération, tandis que la puissance de chauffage est indiquée en Btu/h ou en kW. On peut facilement convertir une unité en une autre à l'aide du tableau suivant :

- 1 tonne = 12 000 Btu/h
- 1 kW = 3 412 Btu/h
- 1 tonne = 3,517 kW

FIGURE 15. POMPE À CHALEUR HORIZONTALE

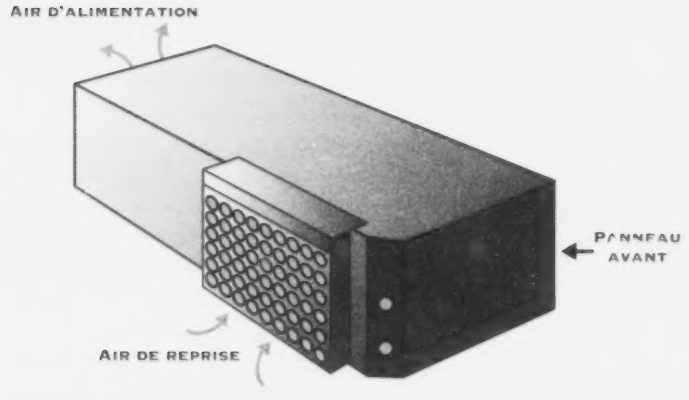
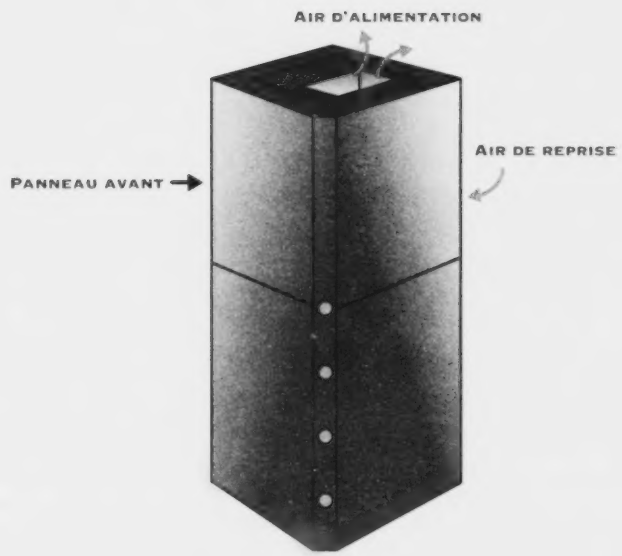


FIGURE 16. POMPE À CHALEUR VERTICALE



Les pompes à chaleur de systèmes géothermiques sur le marché affichent des niveaux de rendement variés. Les appareils à haute efficacité contiennent en général un compresseur à haute efficacité, un plus gros serpentin à air, un moteur de ventilateur à haute efficacité et, parfois, un échangeur de chaleur frigorigène-eau plus gros. Ce type d'appareil s'accompagne généralement d'un prix plus élevé, mais cela peut être l'option la plus rentable pour un projet donné. Il est difficile d'établir une règle générale au sujet du choix d'un appareil sur la base du rendement, car les facteurs d'ordre économique et les mérites de chaque système varient d'un cas à l'autre.

TABLEAU 4. COÛT TYPIQUE DE POMPES À CHALEUR

Niveau de rendement de la pompe à chaleur	Coût typique (par kW de refroidissement)
Standard	235 $
Moyen	270 $
Élevé	330 $

Dimensionnement des pompes à chaleur

Les pompes à chaleur des systèmes décentralisés sont généralement dimensionnées suivant les charges de pointe de chaque zone. En conséquence, chaque pièce maintiendra sa température en permanence. La charge globale ne devrait servir qu'à dimensionner le matériel central, qui peut tirer parti de la diversité potentielle de charges (charges de chauffage annulant des charges de refroidissement) pour réduire la puissance totale requise. Dans les systèmes géothermiques, la boucle souterraine

devrait être dimensionnée suivant la charge globale afin d'assurer une taille et un coût minimaux. Si l'on fait appel à des pompes à chaleur centrales, celles-ci peuvent également être dimensionnées en fonction des charges globales. Donc, le type de système de distribution utilisé dans un bâtiment aura un effet sur la dimension finale du matériel de chauffage et de refroidissement.

Pompage

Une sélection inadéquate des pompes et de leurs systèmes de contrôle, ainsi qu'une mauvaise conception du réseau de tuyauterie peuvent nuire énormément au rendement du système géothermique.

Les systèmes à boucle de sol et à eau souterraine ont besoin de pompes. Il en faut dans un système à boucle de sol pour faire circuler le liquide (l'eau ou la solution antigel) dans tout le bâtiment et dans la boucle souterraine. Pour sa part, le système à eau fait appel à des pompes pour faire circuler le liquide à travers la boucle du bâtiment, ainsi qu'à des pompes séparées pour l'eau souterraine.

Les coûts des projets de systèmes à eau souterraine sont parfois prohibitifs en raison de besoins excessifs de pompage (p. ex., si la nappe phréatique est trop profonde ou si la perte de pression à travers le système est trop élevée).

Il existe beaucoup d'options pour minimiser les besoins de pompage dans ces deux types de systèmes. Les concepteurs de systèmes géothermiques sont les plus en mesure de choisir les pompes et la disposition des tuyaux qui maximiseront le rendement économique d'un système donné.

En règle générale, les systèmes à boucle de sol doivent posséder une puissance de pompage installée inférieure à 16 W par kW de charge globale de pointe. Il importe de tenir compte de la charge globale de pointe, plutôt que de la puissance de pompe à chaleur installée, pour juger de l'adéquation de la puissance de pompage. La diminution du débit aux pompes à chaleur inactives (vanne électromagnétique et vitesse variable) est hautement recommandée.

Dans le cas de la puissance de pompage d'un système à eau souterraine, chaque projet doit être jugé selon ses mérites. L'analyse globale du rendement d'un système (p. ex., rendement de la pompe à chaleur et de la pompe de puits) devrait toujours prendre en compte le débit d'eau souterraine optimal et la puissance de pompage qui lui est associée. Ces données sont nécessaires, car le rendement de la pompe à chaleur sera généralement très influencé par le débit d'eau souterraine choisi. Comme pour les systèmes à boucle de sol, il faut tenir compte de la charge globale – et non de la puissance installée – dans les calculs.

Conseils sur le choix et le dimensionnement des pompes à chaleur

- La pompe à chaleur d'un système géothermique doit être dimensionnée de telle sorte que, à sa capacité minimale, sa puissance ne dépasse pas 125 p. 100 de la charge de refroidissement. Si l'on dépasse cette limite, cela peut entrainer une déshumidification inadéquate et un fonctionnement médiocre.
- Il faut utiliser des pompes à chaleur à plage de température étendue.
- On recommande un taux de rendement énergétique en mode refroidissement (EER) minimal de 13, conformément aux normes de la CSA ou de l'Air-Conditioning and Refrigeration Institute (ARI).
- Il faut interpréter prudemment les cotes EER et COP des appareils à plusieurs vitesses ou à vitesse variable. Tenez toujours compte du EER à plein régime.

Bien veiller à ce que les systèmes de contrôle des pompes à chaleur soient facilement intégrables aux systèmes du bâtiment, et qu'ils puissent être entretenus par des préposés à l'entretien de systèmes de CVC expérimentés.

Évaluation des charges de chauffage et de refroidissement

Évaluer les charges d'un bâtiment représente une étape cruciale dans un projet de système géothermique. Étant donné le coût initial habituellement plus élevé d'un tel système, le surdimensionnement des pompes à chaleur ou de la boucle souterraine peut réduire de beaucoup son attrait économique.

Pour déterminer les charges de chauffage et de refroidissement, il faut d'abord diviser le bâtiment en zones thermiques. Puis, les charges de zone sont évaluées en fonction des pertes thermiques de l'enveloppe, des gains solaires, des gains internes (éclairage, occupants, équipement), de l'infiltration et de la ventilation.

Les charges de chauffage des zones devraient être établies selon la température type en hiver. Quant aux charges de refroidissement, on peut les calculer en utilisant les méthodes les plus récentes de l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE). Ces méthodes de calcul tiennent compte de l'effet des gains solaires, du stockage thermique dans les matériaux du bâtiment et des écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur. Le calcul des charges de refroidissement doit être effectué pour trois heures différentes du jour de calcul (habituellement le 31 juillet).

Il faut connaître les charges globales de chauffage et de refroidissement au moment de la charge de pointe pour dimensionner le matériel central et la boucle souterraine. On doit évaluer la charge globale de chauffage pour les conditions de nuit. Pour le refroidissement, on doit l'évaluer aux trois mêmes heures utilisées pour les charges de zone, et retenir la plus élevée.

Commandes

Pompes à chaleur à eau

Le système de commande des pompes à chaleur à eau consiste en un thermostat mural à basse tension pour chaque appareil. Ce thermostat peut être doté d'une fonction de réajustement du point de consigne durant la nuit. À la suite de défaillances, la réinitialisation doit se faire à l'aide du thermostat plutôt que par les commandes de l'appareil même. Le thermostat commande également le fonctionnement du ventilateur.

Dès qu'une pompe à chaleur cesse de fonctionner à cause de la température trop basse ou trop élevée du frigorigène, une alarme ou un témoin lumineux sur le thermostat avertit les occupants. S'il y a défaillance de la pompe centrale, une alarme dans la salle des équipements s'actionne, même si la pompe auxiliaire est disponible.

Pompe de circulation

On peut commander au moyen d'une horloge un système à deux pompes pour arrêter celles-ci automatiquement durant les périodes d'inoccupation prévues. Dans beaucoup d'applications, les pompes fonctionnent continuellement. Un interrupteur manuel est habituellement installé pour permettre de faire alterner les pompes afin d'équilibrer leurs périodes de fonctionnement et l'usure qui en résulte. On peut également se servir d'un variateur de vitesse pour réduire la consommation d'énergie de pompage.

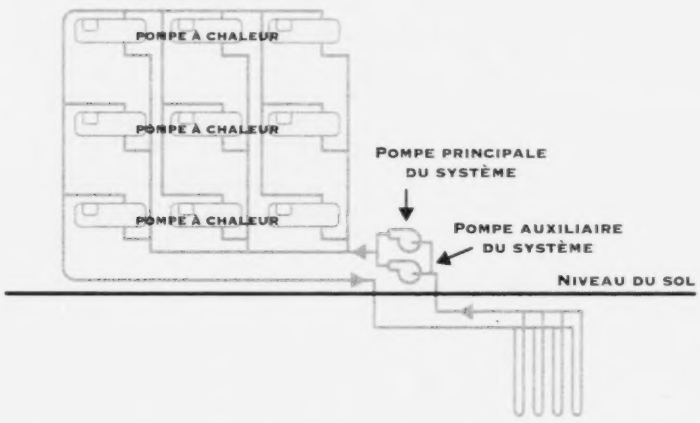
Commandes centrales et système de gestion de l'énergie

Les gros systèmes peuvent être dotés de panneaux de commande centralisés qui permettent le contrôle et la surveillance de chacune des pompes à chaleur. Avec un tel système, le point de consigne nocturne peut être fixé à partir d'un poste central, tout comme la reprise matinale. Le fonctionnement des pompes à chaleur peut en outre être commandé à partir d'un poste central (programmation des horaires), tout comme celui du système de ventilation.

SYSTÈME DE DISTRIBUTION

Les systèmes géothermiques commerciaux peuvent s'adapter à une grande diversité de systèmes de distribution, y compris les systèmes à air et à eau, centraux et répartis. Toutefois, le type de système le plus courant est celui de la pompe à chaleur à boucle d'eau classique. Dans ce type de système, chaque zone est dotée d'une ou de plusieurs pompes à chaleur eau-air. Tous les appareils, qu'ils soient à la périphérie ou au centre, sont raccordés à un système à eau commun. Dans les systèmes à boucle de sol, l'échangeur de chaleur souterrain est normalement raccordé directement à la boucle du bâtiment. Par contre, dans les systèmes à eau souterraine, le réseau à eau du bâtiment est habituellement séparé de la boucle souterraine au moyen d'un échangeur de chaleur à plaques.

FIGURE 17. SYSTÈME DE DISTRIBUTION TYPIQUE DE SYSTÈME À BOUCLE DE SOL



Les pompes à chaleur d'un système typique, comme l'illustre la figure 17, sont raccordées en parallèle à un réseau de distribution à deux tuyaux à circulation continue. Ainsi, une pompe à chaleur peut fournir de la chaleur à la boucle tandis qu'une autre en extrait, ce qui permet le transfert de chaleur entre les appareils. Les gains et pertes nets de chaleur sont transférés au sol, au plan d'eau ou à la nappe phréatique. Les pompes à chaleur dans ces systèmes décentralisés se présentent habituellement sous forme d'appareils monobloc qui comprennent un compresseur, des échangeurs de chaleur, un ventilateur, un filtre et des commandes. Ces appareils peuvent être suspendus au plafond, installés dans un placard ou utilisés comme cabinets intégrés à la périphérie du bâtiment. Les aires communes comme les halls d'entrée ou les salles de réunion peuvent être dotées de pompes à chaleur de plus grande capacité.

Un type courant de système central utilise un réseau de distribution à deux tuyaux raccordé à une ou plusieurs pompes à chaleur de grande capacité, qui refroidissent ou chauffent l'eau qui alimente ce réseau. Le réseau alimente des ventilo-convecteurs dans les diverses zones du bâtiment. Un système de ventilo-convecteurs à deux tuyaux ne peut refroidir et chauffer en même temps, ce qui écarte la possibilité de récupérer la chaleur pour le chauffage des locaux. Toutefois, un système de distribution central à quatre tuyaux permet de chauffer et de refroidir simultanément. Il consiste en deux réseaux de tuyauterie séparés (chacun avec une boucle d'alimentation et de retour) connectés au condenseur et à l'évaporateur de la pompe à chaleur, ce qui procure à la fois de l'eau refroidie et de l'eau chaude dans tout le bâtiment. Cette configuration se prête bien également à l'exploitation de la fraîcheur du sol en été à des fins de refroidissement. Les systèmes de distribution par rayonnement à partir du plancher sont également couramment utilisés avec les systèmes géothermiques.

Le système modulaire est une variante du système décentralisé. Il comprend des pompes à chaleur, des pompes et des boucles d'eau propres à certaines parties du bâtiment. Ce type de système permet les réglages, le fonctionnement et l'entretien indépendants pour chacune des zones, mais ne permet pas de profiter entièrement de la diversité des charges pour le dimensionnement optimal de la boucle souterraine.

Comme il a été mentionné, si toutes les pompes à chaleur sont raccordées à une boucle commune de distribution de liquide, la boucle souterraine peut être conçue en fonction de la charge globale du bâtiment. Toutefois, dans les bâtiments où on modifie le point de consigne durant la nuit, la charge de reprise matinale doit être prise en compte lors du dimensionnement de la boucle souterraine car, à ce moment, toutes les pompes à chaleur fonctionneront probablement dans le même mode.

Alimentation en air neuf

Peu importe le système de distribution, la quantité d'air neuf devrait respecter ou dépasser les exigences des règlements locaux; ces règlements sont souvent élaborés conformément à la norme 62 de l'ASHRAE, *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. Dans le système typique à boucle d'eau, l'air neuf est souvent alimenté dans le plenum de retour d'air. L'entreplafond sert de plenum dans beaucoup d'immeubles : l'air neuf arrive dans cet espace, où les pompes à chaleur de zone obtiennent leur apport d'air. Dans certains cas, l'air neuf est acheminé directement à l'entrée d'air du ventilateur de la pompe à chaleur, où il se mélange à l'air de reprise. Une autre possibilité consiste à diffuser l'air neuf directement dans la pièce. Il faut faire attention pour assurer une diffusion adéquate et empêcher les courants d'air froid. Les corridors peuvent également être utilisés pour alimenter d'air extérieur les pièces adjacentes qui possèdent une ventilation d'extraction mécanique. Peu importe la configuration retenue, il faut assurer un nombre de conduits suffisants pour la distribution d'air neuf afin de veiller à ce que tous les appareils reçoivent une quantité adéquate d'air extérieur, et il faut éviter le court-circuitage des bouches d'évacuation des toilettes. Dans tous les cas, si la quantité d'air neuf fait en sorte que la température d'entrée d'air aux pompes à chaleur (après le mélange avec l'air de reprise) baisse sous 10 °C, il faudra chauffer l'air neuf. Un ventilateur-récupérateur de chaleur, qui chauffe l'air neuf avec la chaleur de l'air d'évacuation, constitue un moyen éconergétique d'y parvenir.

FIGURE 18. MÉLANGE D'AIR NEUF À LA POMPE À CHALEUR

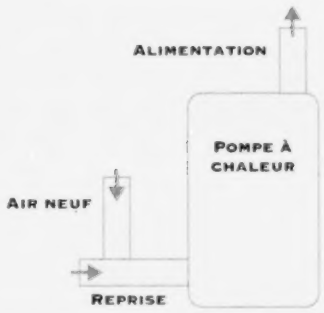
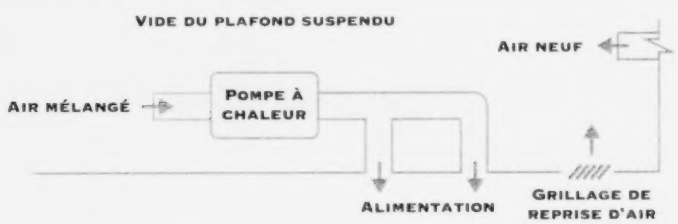


FIGURE 19. VIDE DU PLAFOND UTILISÉ COMME CAISSON D'AIR DE RETOUR



EAU CHAUDE SANITAIRE

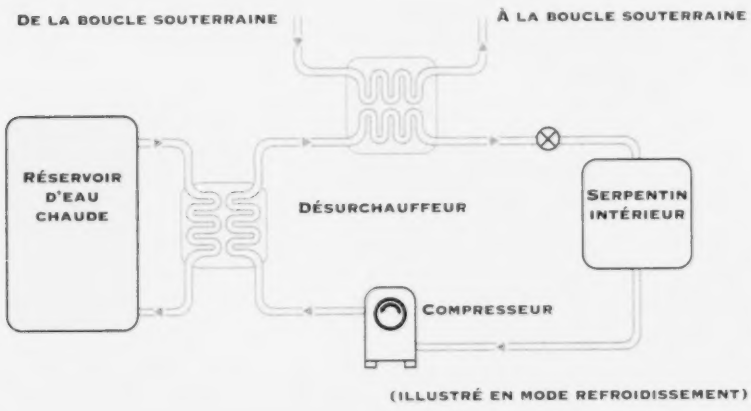
La technologie à compression de vapeur peut procurer le chauffage de l'eau sanitaire de façon beaucoup plus efficace qu'une résistance électrique ou les combustibles fossiles.

Habituellement, un système géothermique peut fournir de l'eau chaude sanitaire selon l'une de deux configurations principales, illustrées aux figures 20 et 21. Il convient de noter que les échangeurs de chaleur à double paroi sont habituellement exigés par les règlements locaux pour les deux configurations.

Désurchauffeurs

Les désurchauffeurs sont couramment intégrés en usine aux pompes à chaleur de systèmes géothermiques. Ils s'adaptent facilement à diverses situations et sont très efficaces. Toutefois, ils chauffent l'eau exclusivement lorsque les pompes à chaleur fonctionnent pour répondre à la demande de chauffage ou de refroidissement des locaux et, par conséquent, ils nécessitent un chauffage auxiliaire. Les désurchauffeurs répondent rarement à l'ensemble des besoins en eau chaude sanitaire dans les bâtiments commerciaux.

FIGURE 20. DÉSURCHAUFFEUR



Le principe de fonctionnement du désurchauffeur est très simple : il utilise la vapeur du frigorigène chaud qui quitte le compresseur pour chauffer l'eau par le biais d'un échangeur de chaleur liquide-frigorigène relativement petit. Le désurchauffeur peut transférer de 5 à 15 p. 100 de l'énergie qui serait autrement dissipée par le condenseur.

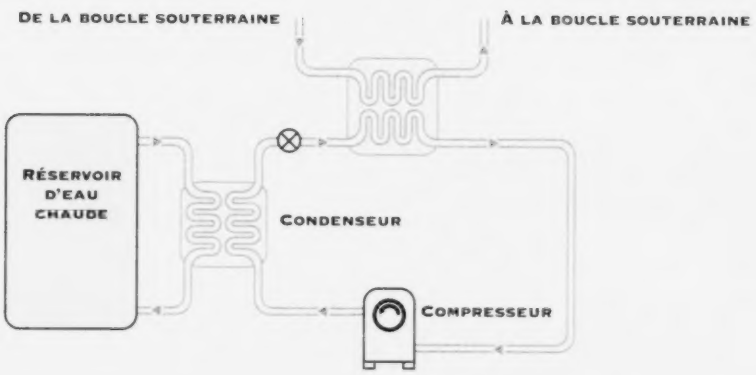
L'eau chaude produite par le désurchauffeur durant le fonctionnement en mode refroidissement est pratiquement gratuite, vu qu'elle est produite selon le coefficient de performance (COP) du système en mode chauffage.

Chauffe-eau à pompe à chaleur

Les chauffe-eau à pompe à chaleur sont conçus spécialement pour chauffer l'eau. Contrairement aux désurchauffeurs, ils peuvent pourvoir sans système auxiliaire aux besoins en eau chaude sanitaire de tout un bâtiment.

Dans les systèmes géothermiques, ces chauffe-eau consistent en des pompes à chaleur spécialisées eau-eau. Celles-ci font appel à la boucle souterraine (ou à la boucle du bâtiment) comme source de chaleur à longueur d'année et au réservoir d'eau chaude sanitaire comme puits de chaleur. Durant la saison de climatisation, la pompe à chaleur tire son énergie de la chaleur rejetée dans la boucle souterraine par d'autres pompes à chaleur qui refroidissent le bâtiment.

FIGURE 21. CHAUFFE-EAU À POMPE À CHALEUR



Le rendement des chauffe-eau à pompe à chaleur dépend du COP du système, peu importe le mode de fonctionnement. La température maximale de l'eau obtenue au moyen de chauffe-eau à pompe à chaleur ou de désurchauffeurs est d'environ 55 °C.

FACTEURS LIÉS AU BÂTIMENT

La fonction principale d'un système géothermique consiste à conditionner l'air d'un bâtiment. Donc, les besoins du bâtiment priment lors de la conception du système, comme le décrit la section technique sur le dimensionnement de la boucle souterraine (voir le chapitre 7). Voici la liste des principaux paramètres servant à la conception d'un système :

- les charges de refroidissement et de chauffage de pointe des diverses sections du bâtiment;
- les charges globales de refroidissement et de chauffage pour l'ensemble du bâtiment;
- une estimation de la consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et le refroidissement (pour les systèmes à boucle de sol).

Les différentes sections du bâtiment correspondent à des zones de conditionnement de l'air, comme l'indique la figure 22, « Plan d'étage de bâtiment type ». Une zone peut être définie comme un groupe de pièces qui partagent :

- un même usage ou fonction de l'espace (p. ex., des bureaux par rapport à une salle de café);
- un système de chauffage et de refroidissement et des points de consigne communs (p. ex., les pièces dont les fenêtres font face au nord par rapport au sud);
- les mêmes périodes de chauffage et de refroidissement (p. ex., les pièces à la périphérie du bâtiment par rapport aux pièces centrales).

Charges nettes et charges de pointe

À tout moment, les zones d'un bâtiment connaissent des charges thermiques différentes. Certains locaux peuvent avoir besoin de refroidissement tandis que d'autres nécessiteront du chauffage. La charge instantanée nette du bâtiment est souvent inférieure à la somme des charges de calcul pour chaque pièce, car les charges de pointe ne se produisent pas simultanément.

La conception de la boucle souterraine en fonction de la charge nette permet de réduire la dimension calculée et le coût, sans compromettre le rendement.

NOTA : LES CHIFFRES 1 À 9 REPRÉSENTENT DES ZONES

FACTEURS LIES A L'EFFICACITE ENERGETIQUE

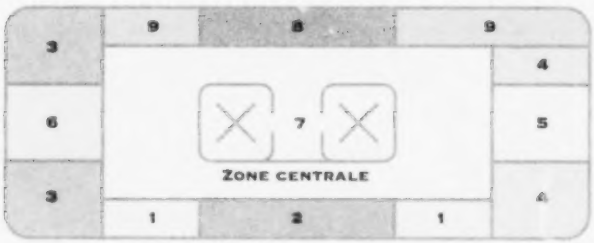
Comme les pompes à chaleur à air, les systèmes géothermiques présentent des valeurs de rendement très variées. Les systèmes à eau souterraine ou à boucle ouverte ont un COP de chauffage de 3,0 à 4,0, et un taux d'efficacité énergétique en mode refroidissement (EER) entre 11,0 et 17,0. Les systèmes à boucle fermée ont un COP de chauffage entre 2,5 et 4,0, et un EER entre 10,5 et 20,0.

Rendement énergétique

Les rendements de pompes à chaleur de systèmes géothermiques se définissent selon deux paramètres : le coefficient de performance (COP) et le taux de rendement énergétique en mode refroidissement (EER). L'EER en régime permanent se définit comme la puissance de refroidissement en Btu/h divisée par la puissance électrique (consommation) en watts. Cela donne le rendement en mode refroidissement, sous forme standard. En mode chauffage, l'indicateur utilisé est le COP, défini comme la production de chaleur divisée par la puissance électrique (tous deux s'exprimant en les mêmes unités de mesure). L'EER et le COP ne tiennent pas compte de la consommation d'électricité des pompes ou des ventilateurs centraux. L'EER est connu également sous le nom « COP de refroidissement ».

Le niveau minimal d'efficacité énergétique pour ces appareils est réglementé par les mêmes instances qui dictent les normes pour les pompes à chaleur à air. L'efficacité des systèmes géothermiques a connu une amélioration remarquable au cours des cinq dernières années. Les mêmes améliorations technologiques des compresseurs, des moteurs et des commandes qui sont à la disposition des fabricants de pompes à chaleur à air conduisent maintenant à des niveaux plus élevés d'efficacité pour les systèmes géothermiques.

FIGURE 22. PLAN D'ÉTAGE D'UN BÂTIMENT TYPE



NOTA : LES CHIFFRES 1 À 9 REPRÉSENTENT DES ZONES

FACTEURS LIES A L'EFFICACITE ENERGETIQUE

Comme les pompes à chaleur à air, les systèmes géothermiques présentent des valeurs de rendement très variées. Les systèmes à eau souterraine ou à boucle ouverte ont un COP de chauffage de 3,0 à 4,0, et un taux d'efficacité énergétique en mode refroidissement (EER) entre 11,0 et 17,0. Les systèmes à boucle fermée ont un COP de chauffage entre 2,5 et 4,0, et un EER entre 10,5 et 20,0.

Rendement énergétique

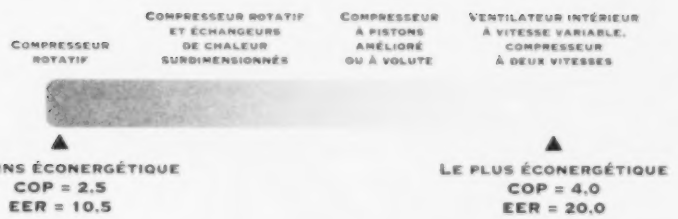
Les rendements de pompes à chaleur de systèmes géothermiques se définissent selon deux paramètres : le coefficient de performance (COP) et le taux de rendement énergétique en mode refroidissement (EER). L'EER en régime permanent se définit comme la puissance de refroidissement en Btu/h divisée par la puissance électrique (consommation) en watts. Cela donne le rendement en mode refroidissement, sous forme standard. En mode chauffage, l'indicateur utilisé est le COP, défini comme la production de chaleur divisée par la puissance électrique (tous deux s'exprimant en les mêmes unités de mesure). L'EER et le COP ne tiennent pas compte de la consommation d'électricité des pompes ou des ventilateurs centraux. L'EER est connu également sous le nom « COP de refroidissement ».

Le niveau minimal d'efficacité énergétique pour ces appareils est réglementé par les mêmes instances qui dictent les normes pour les pompes à chaleur à air. L'efficacité des systèmes géothermiques a connu une amélioration remarquable au cours des cinq dernières années. Les mêmes améliorations technologiques des compresseurs, des moteurs et des commandes qui sont à la disposition des fabricants de pompes à chaleur à air conduisent maintenant à des niveaux plus élevés d'efficacité pour les systèmes géothermiques.

Dans la gamme d'efficacité faible à moyenne, les systèmes géothermiques font appel à des compresseurs rotatifs ou à pistons à une vitesse, à des serpentins frigorigène-air relativement standard et à des échangeurs de chaleur frigorigène-eau surdimensionnés et à grande surface de contact. Les appareils à efficacité moyenne emploient des compresseurs à volute (*scroll*) ou des compresseurs à pistons améliorés. Quant aux appareils à haute efficacité, ils tendent à utiliser des compresseurs à deux vitesses ou des moteurs de ventilateur intérieur à vitesse variable ou les deux, avec plus ou moins les mêmes échangeurs de chaleur.

FIGURE 23. RENDEMENT DES SYSTÈMES À BOUCLE OUVERTE
(À UNE TEMPÉRATURE D'EAU À L'ENTRÉE DE 10 °C)

FIGURE 24. RENDEMENT DES SYSTÈMES À BOUCLE FERMÉE
(À UNE TEMPÉRATURE D'EAU À L'ENTRÉE DE 10 °C)



Chapitre 3 : Conception de la boucle souterraine

Le présent chapitre présente un aperçu des exigences de conception des boucles souterraines. Les questions relatives à la conception sont abordées de manière plus complète à la partie 2 du présent guide.

Séquence de conception typique

La conception d'un système géothermique s'effectue généralement selon la séquence suivante :

1. Déterminer les conditions de conception locales, les données climatiques ainsi que les caractéristiques thermiques du sol.
2. Établir les charges de chauffage et de refroidissement du bâtiment selon les conditions climatiques locales.
3. Choisir les composants des autres systèmes de CVC envisagés, y compris le type de système de distribution d'air, et procéder au dimensionnement selon les besoins. Choisir également l'équipement qui répondra à la demande calculée à l'étape 2 (en utilisant l'estimation préliminaire des températures d'entrée de l'eau pour établir les puissances et les rendements de chauffage et de refroidissement des pompes à chaleur).
4. Préciser les besoins énergétiques mensuels et annuels de chauffage et de refroidissement du bâtiment.
5. Effectuer la sélection préliminaire du type de boucle souterraine.
6. Procéder à la conception préliminaire de la boucle souterraine.
7. Déterminer la résistance thermique du sol.
8. Établir la longueur requise de la boucle souterraine; recalculer les températures de l'eau à l'entrée et à la sortie selon les charges du système et la conception de la boucle souterraine.
9. Revoir la conception du système, le cas échéant, pour équilibrer les exigences de charge (chauffage et refroidissement) et le rendement du système. À noter que la conception et le dimensionnement du système en fonction d'une saison particulière (notamment celle de refroidissement) aura des effets sur le rendement et la capacité de répondre aux charges durant l'autre saison.
10. Analyser le coût global du système conçu (ainsi que des autres options) sur son cycle de vie.

L'évaluation des charges du bâtiment constitue l'étape initiale; c'est l'une des plus importantes d'un projet de système géothermique.

Conception de la boucle souterraine

Peu importe le type de boucle souterraine retenu, les spécifications et les dimensions de celle-ci dépendent d'un certain nombre de choix de conception, comme le type de système de distribution (voir la section sur les systèmes de distribution aux pages 23 et 24), le rendement des pompes à chaleur, etc. L'un des choix déterminants consiste à savoir si la boucle souterraine devra répondre à la charge de chauffage ou à celle de refroidissement. Ces deux charges entraînent habituellement des exigences différentes – parfois très différentes. Dans ces cas, la conception d'un système selon la plus importante des deux charges n'est pas nécessairement l'option la plus rentable, et le concepteur doit choisir la charge, soit de refroidissement ou de chauffage, qui servira de point de départ. Dans tous les cas, les charges attribuables aux pompes et au chauffage de l'eau sanitaire doivent être considérées dans les calculs finals de dimensionnement de la boucle souterraine.

Quand la boucle souterraine n'a pas été conçue pour répondre entièrement à l'une des charges du bâtiment, il faut prévoir des systèmes auxiliaires. Par exemple, pour nombre d'immeubles dans les régions à climat de modéré à chaud – et dans une moindre mesure dans les régions plus froides – la charge de refroidissement domine la charge de chauffage. Le choix d'un échangeur souterrain pour répondre entièrement à la charge dominante pourrait entraîner un système trop gros qui rendrait l'énergie du sol non économique. Dans un tel cas, la boucle pourrait être dimensionnée pour ne répondre qu'à la charge de chauffage, et un évacuateur de chaleur excédentaire (p. ex., une tour de refroidissement) pourrait être ajouté au système pour compenser la demande supérieure de refroidissement. Dans les climats froids, la situation peut être inversée, et le dimensionnement de la boucle souterraine visant les charges de refroidissement pourrait déboucher sur un système plus petit, mais qui exigera l'utilisation d'un chauffage d'appoint en hiver. Une meilleure option consisterait à réduire la charge de chauffage en optimisant la conception d'ensemble du bâtiment (p. ex., en utilisant un dispositif de récupération de la chaleur de l'air évacué).

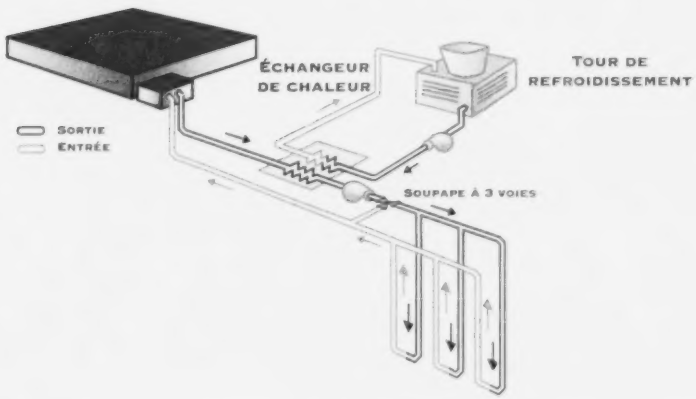
Le choix de la conception du système en fonction des charges de refroidissement ou de chauffage est étroitement lié aux variables économiques du projet, et devrait être évalué par le concepteur durant l'analyse de préfaisabilité par des études de sensibilité.

Enfin, le dimensionnement d'une boucle souterraine fermée fait intervenir également une plus grande incertitude quant aux conditions du sol, qui sont variables. Une analyse de l'emplacement pour établir la conductivité thermique et d'autres propriétés de transfert de la chaleur du sol environnant peut être requise. Cela devrait incomber au professionnel responsable de la conception, car ces données pourraient avoir des effets importants sur la conception finale. Une norme de la CSA concernant la conception et l'installation des systèmes géothermiques (CAN/CSA C448 série 02) a été élaborée; il faudrait la consulter quand on procède à l'analyse d'un système éventuel.

Tour de refroidissement : évacuation de la chaleur excédentaire

Si la boucle souterraine est dimensionnée en fonction des exigences de chauffage, une tour de refroidissement peut contribuer à répondre à la charge estivale. Au besoin, on peut alors utiliser à la fois la boucle souterraine et la tour de refroidissement pour évacuer la chaleur excédentaire. Puisque la tour de refroidissement consiste habituellement en un circuit d'eau ouvert, un échangeur de chaleur à plaques est souvent requis pour éviter le contact entre l'eau de la tour et le liquide de la boucle souterraine ou de la boucle du bâtiment.

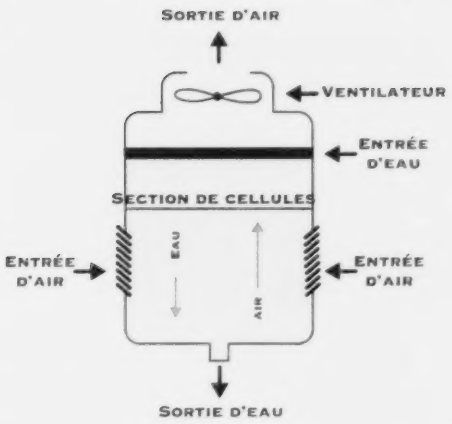
Figure 25. Évacuateur de chaleur auxiliaire – tour de refroidissement



De plus, les aires centrales du bâtiment nécessitent souvent du refroidissement tard dans la saison de chauffage. Les pompes à chaleur dans ces zones peuvent alors bénéficier de refroidissement gratuit grâce à des serpentins distincts, appelés serpentins économiseurs. Quand la température extérieure est suffisamment basse, la tour de refroidissement peut maintenir le liquide de la boucle du bâtiment suffisamment froid pour permettre le refroidissement des aires centrales à l'aide de ces serpentins, sans recours aux compresseurs. On peut réduire la température de la boucle à un niveau approprié si l'eau contourne le raccord à la boucle souterraine au moyen d'une soupape à trois voies. Les zones centrales peuvent ainsi être refroidies sans compresseurs alors que les pompes à chaleur périphériques fonctionnent toujours en mode chauffage. La viabilité économique de cette option doit être analysée cas par cas.

Outre la tour de refroidissement, une autre option consiste à recourir à un refroidisseur par évaporation à circuit fermé. Dans ce cas, l'échangeur de chaleur est éliminé, et l'eau de la boucle passe par le serpentin interne du refroidisseur. Si le raccordement direct de la boucle souterraine ou du bâtiment à une tour de refroidissement pose problème, on peut également parvenir au même résultat à l'aide d'un refroidisseur à air.

FIGURE 26. FONCTIONNEMENT DE LA TOUR DE REFROIDISSEMENT



Ces tours utilisent de gros ventilateurs pour pousser l'air à travers l'eau recirculée. L'eau tombe dans une section dotée de cellules qui contribuent à augmenter la durée de contact entre l'eau et l'air et à maximiser l'échange de chaleur entre les deux. Le transfert de chaleur sensible et de chaleur latente des gouttelettes d'eau à l'air ambiant permet de refroidir l'eau.

Le système d'évaporation nocturne représente une variante de la tour de refroidissement, dans laquelle des tours de refroidissement sont utilisées la nuit pour rejeter la chaleur excédentaire qui s'accumule dans la boucle souterraine, par suite d'une forte utilisation du système géothermique durant le jour. Cela empêche que le liquide dans la boucle perde son efficacité comme puits de chaleur à cause de sa température. Ces systèmes sont particulièrement avantageux dans des climats où les journées sont extrêmement chaudes, mais les nuits fraîches, ou lorsque le service public local offre l'option de tarifs selon l'heure de consommation.

CHAUFFAGE D'APPOINT

Le chauffage d'appoint peut se révéler une option intéressante pour réduire les dimensions de la boucle souterraine pour les bâtiments où le chauffage domine.

Dans bien des systèmes commerciaux, un appareil chauffe-eau raccordé à la boucle du bâtiment – comme cela se fait dans les systèmes géothermiques à eau à boucle fermée – procure la chaleur d'appoint. Cette méthode permet une marge de manœuvre dans le dimensionnement de la chaudière, puisqu'elle abaisse la puissance installée, comparativement aux chauffe-conduits individuels ou aux plinthes chauffantes. Le fonctionnement de la chaudière est surveillé pour maintenir une température minimale de la boucle à l'entrée des pompes à chaleur. On pourrait y ajouter une commande de réinitialisation pour éviter que le chauffe-eau soit mis en marche, à moins que la température extérieure tombe en dessous d'un point de consigne donné.

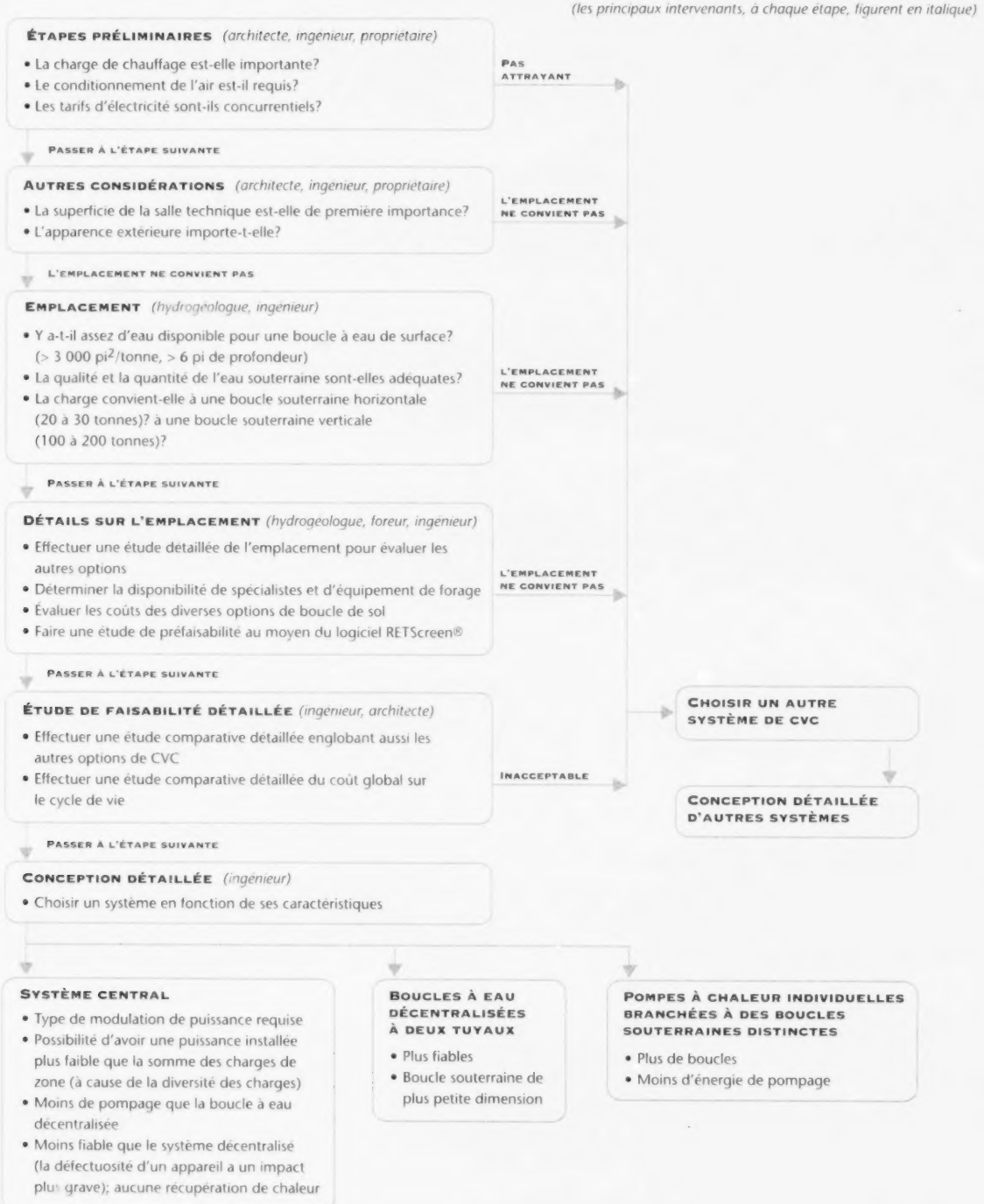
L'utilisation de chauffage d'appoint doit être évitée autant que possible, car elle réduit l'efficacité globale du système. Une bonne conception du bâtiment concernant l'enveloppe, le système d'alimentation en air neuf, etc., peut permettre qu'un système géothermique réponde entièrement à la charge de chauffage sans recourir au chauffage d'appoint, même dans un climat froid.

ÉTAPES TYPES D'INSTALLATION D'UN SYSTÈME GÉOTHERMIQUE

La figure 27 présente un sommaire des étapes types de l'installation d'un système géothermique.

FIGURE 27. DÉROULEMENT TYPE D'UN PROJET DE SYSTÈME GÉOTHERMIQUE

(les principaux intervenants, à chaque étape, figurent en italique)



Chapitre 4 : Facteurs importants

Facteurs environnementaux

Fluides de boucle souterraine

Des solutions antigel sont requises dans les systèmes géothermiques à boucle fermée dans les climats froids pour empêcher le gel durant le fonctionnement en mode chauffage. Il importe d'être conscient des effets et risques éventuels des options possibles, étant donné que certains agents antigel sont toxiques, corrosifs ou inflammables.

Boucle souterraine de type « slinky »

L'éthanol est un fluide thermique efficace à faible toxicité, et il est biodégradable. Le propylèneglycol n'est ni toxique ni corrosif ni inflammable, mais son efficacité thermique est plus faible. D'un point de vue environnemental (et pour le faible risque qu'il entraîne pour la santé, l'incendie et la corrosion), le propylèneglycol est un antigel attrayant. Par contre, l'acétate de potassium et le méthanol entraînent le risque le plus élevé de pollution de l'eau et du sol. Le méthanol, bien qu'il soit un fluide thermique très efficace, est très toxique et non biodégradable. Son utilisation est limitée dans beaucoup de régions; vérifier auprès des autorités locales. L'acétate de potassium, même s'il est efficace et biodégradable, peut engendrer des fuites et la corrosion dans des systèmes qui possèdent des joints filetés.

Par conséquent, il faut faire très attention lorsqu'on utilise le méthanol (risques d'incendie, pour la santé et l'environnement) ou l'acétate de potassium (fuites et risques environnementaux). Le choix de solution antigel devrait être approuvé par le fournisseur de pompes à chaleur.

Les concepteurs et ingénieurs de systèmes géothermiques doivent toujours évaluer le risque et les effets du fluide de boucle souterraine retenu.

Incidences de la température du sol sur l'environnement

Il existe peu ou pas de preuves documentées des impacts négatifs susceptibles d'affecter les organismes ou les plantes en raison des températures du sol basses (et élevées) liées au fonctionnement des systèmes géothermiques.

L'utilisation de systèmes à boucle ouverte (dont ceux à eau de puits) est limitée dans le cas des grandes installations commerciales et industrielles, en raison du fait qu'ils nécessitent un approvisionnement soutenu en eau souterraine de haute qualité, d'un peu plus de 3 litres par minute pour chaque kW de production nominale. L'eau évacuée d'un système géothermique du sol doit retourner à l'aquifère pour éviter l'épuisement ou la contamination d'autres zones aquifères.

L'extraction et l'utilisation de l'eau souterraine et de l'eau de surface sont soumises aux dispositions des lois et règlements provinciaux et territoriaux prévus pour protéger les ressources en eau. Conformément à la norme CAN/CSA-C448 série 02, il faut tenir compte :

- des servitudes ou droits d'accès à l'équipement par des personnes ou organismes;
- de la qualité et de la composition chimique de l'eau souterraine;
- de la preuve d'un rendement durable de pointe (y compris pour d'autres services domestiques);
- de l'emplacement et de la durabilité des puits d'injection.

Frigorigènes : couche d'ozone et réglementation

Comme il est décrit dans l'aperçu du cycle de réfrigération (voir la page 5), les systèmes géothermiques nécessitent habituellement l'utilisation d'un frigorigène. Traditionnellement, le liquide le plus courant destiné aux pompes à chaleur était le HCFC-22 (hydrochlorofluorocarbone 22) [R-22].

Toutefois, le HCFC-22 contient du chlore, et même si son potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est beaucoup plus bas que celui des chlorofluorocarbones (CFC) – de 2 à 5 p. 100 de celui du CFC-12 – sa production et son utilisation seront interdites. C'est la raison pour laquelle les HCFC sont parfois appelés des frigorigènes de transition. Le calendrier d'élimination des HCFC pour les pays industrialisés, qui a été convenu dans le cadre du Protocole de Montréal et ses modifications successives, figure au tableau 5. Le HCFC-22 devrait être éliminé dans les pays industrialisés d'ici l'an 2010, et partout d'ici 2020.

TABLEAU 5. CALENDRIER D'ÉLIMINATION DES HCFC

Date	Mesure
1er janvier 1996	• Élimination graduelle des CFC • Gel des niveaux de HCFC à ceux de 1989 + 2,8 p. 100 de la consommation de CFC de 1989 (niveaux de référence)
1er janvier 2004	• Réduction de 35 p. 100 sous les niveaux de référence
1er janvier 2010	• Réduction de 65 p. 100
1er janvier 2015	• Réduction de 90 p. 100
1er janvier 2020	• Élimination des HCFC, tout en permettant un approvisionnement résiduaire jusqu'à 0,5 p. 100 jusqu'à 2030 dans le cas des appareils de réfrigération et de conditionnement d'air existants

La plupart des pompes à chaleur de systèmes géothermiques sur le marché font encore usage du HCFC-22 comme frigorigène, bien que des appareils utilisant le R-404a et le R-410a soient aussi en vente.

Options de rechange au HCFC-22

Des projets de recherche-développement sont en cours pour développer des produits pour remplacer le HCFC-22, puisque celui-ci est de loin le frigorigène le plus utilisé pour les pompes à chaleur et conditionneurs d'air.

Les solutions de rechange à long terme seront probablement des mélanges de divers frigorigènes hydrofluorocarburés, étant donné que leur potentiel de destruction de l'ozone est très faible ou nul.

HFC

Les HFC (hydrofluorocarbones) peuvent être considérés comme une option à long terme pour résoudre le problème des frigorigènes (p. ex., le HFC-134a, le HFC-32 et le HFC-125). Ils ne contiennent pas de chlore. Vu qu'ils ne contribuent pas à appauvrir la couche d'ozone, on les considère comme les principales solutions de rechange au HCFC-22.

Cependant, ils contribuent effectivement au changement climatique. L'utilisation directe des HFC dans des pompes à chaleur géothermiques est impossible, de sorte que les fabricants de frigorigènes conçoivent des « mélanges » de HFC qui imitent les caractéristiques du HCFC-22.

Par exemple, le R-410A est un mélange de HFC-32 et de HFC-125. Autre exemple, le R-407C est un mélange de HFC-134a, de HFC-32 et de HFC-125. Ces produits sont combinés de telle sorte qu'ils se comportent presque comme le HCFC-22, et possèdent des propriétés thermodynamiques semblables.

Lubrifiants

Il faut porter une attention particulière à l'utilisation de lubrifiants avec les nouveaux frigorigènes. Les huiles minérales ne se mélangent pas avec ces frigorigènes. Habituellement, seules les huiles à base d'ester recommandées par le fabricant du frigorigène doivent être utilisées. Les résidus d'huile minérale doivent être complètement enlevés durant la conversion.

LÉGISLATION

La législation fédérale qui s'applique aux systèmes géothermiques se limite à des exigences de sécurité mécanique et à la certification du rendement aux termes de la *Loi sur l'efficacité énergétique*, sauf :

- s'ils sont installés dans des bâtiments dont est propriétaire le gouvernement du Canada (Travaux publics et Services gouvernementaux Canada);
- s'il s'agit de boucles de lac dans des eaux navigables ou des habitats de pêche (Transports Canada);
- s'ils sont dans des parcs nationaux ou des réserves indiennes (Affaires indiennes et du Nord Canada).

Mise en application des codes du bâtiment provinciaux ou territoriaux

Les limites imposées à l'échelon régional visent à protéger des intérêts particuliers. Il faut veiller également à se conformer aux normes nationales. Les autorités municipales sont tenues de mettre en œuvre les règlements provinciaux ou territoriaux là où la responsabilité est assumée par un tiers, comme une société d'aménagement, et à s'assurer du respect du code du bâtiment provincial ou territorial applicable.

Normes nationales

Comme les autres systèmes de CVC, les systèmes géothermiques sont soumis à des normes nationales de rendement en ce qui concerne la certification et l'installation. Les normes ci-après sont indiquées dans la plupart des publications techniques et réglementaires, et elles sont pleinement reconnues par l'industrie, les ingénieurs et les organismes de réglementation.

- CAN/CSA-C448 série 02 – norme de conception et d'installation des systèmes géothermiques, composée de trois parties :

  1) C448.1-02 – *Design and Installation of Earth Energy Systems for Commercial and Institutional Buildings*, qui comprend les exigences applicables à tout système visé par cette norme;

  2) C448.2-02 – *Design and Installation of Earth Energy Systems for Residential and Other Small Buildings*, qui comprend d'autres exigences pour les maisons et les petits bâtiments;

  3) C448.3-02 – *Design and Installation of Underground Thermal Energy Storage Systems for Commercial and Institutional Buildings*, qui s'applique au stockage de l'énergie dans le sol pour utilisation ultérieure.

La série CAN/CSA-C448 remplace les normes CAN/CSA-C445-M92 (R1998), *Conception et installation des systèmes à thermopompe sol-eau pour habitation et autres petits bâtiments*, et CAN/CSA-C447-94 (R1999), *Design and Installation of Earth Energy Heat Pump Systems for Commercial and Institutional Buildings*. Des guides d'installation et d'entretien sont publiés pour appuyer ces normes selon les pratiques approuvées dans l'industrie :

- CAN/CSA-C748-94 (R1999) – norme de rendement des pompes à chaleur à détente directe;

- CAN/CSA-C13256-01 – norme de détermination du rendement des pompes à chaleur offrant des données de COP (chauffage) et de EER (refroidissement), comme l'exige la *Loi sur l'efficacité énergétique* du Canada; les données de rendement certifiées concernant la marque et le modèle sont clairement visibles sur chaque appareil admissible offert sur le marché au Canada. Cette norme comprend deux parties :
  - Partie 1 (CAN/CSA-C13256-1-F01) : Pompes à chaleur eau-air et eau glycolée-air
  - Partie 2 (CAN/CSA-C13256-2-F01) : Pompes à chaleur eau-eau et eau glycolée-eau.

Les parties 1 et 2 remplacent les normes CAN/CSA-C446-94, *Performances des thermopompes sol-eau*, et CAN/CSA-C655-M91, *Performance Standard for Internal Water-Loop Heat Pumps*.

PLANIFICATION, INSTALLATION ET SÉCURITÉ

Contrairement à la plupart des autres systèmes de chauffage et de refroidissement, les systèmes géothermiques exigent des travaux extérieurs d'envergure à l'installation. Il faut procéder à une évaluation géotechnique de l'emplacement et à une définition très précise des services existants pour éviter les dommages accidentels ou les blessures. Un plan détaillé et une spécification montrant la conformité à la norme CAN/CSA-C448.1-02 (voir la section ci-dessus sur les normes nationales) doivent être approuvés par l'organisme local d'inspection.

À bien des endroits, le remplacement d'un système de chauffage et de refroidissement sans changement de source d'énergie n'exige pas normalement de demande officielle aux termes du *Code national du bâtiment du Canada*. Toutefois, les améliorations géothermiques tout comme les premières installations exigent une demande officielle, en raison des règlements provinciaux et territoriaux et de la nécessité des travaux extérieurs. Il ne faut pas amorcer les travaux avant de recevoir l'approbation officielle accompagnée d'un calendrier des inspections prévues. Le recours à l'équipement lourd comme les appareils de forage, les excavatrices et les autres machines de travaux de génie civil exige la délimitation d'une zone où le port du casque protecteur est obligatoire, afin de se conformer aux règlements provinciaux et territoriaux et aux pratiques reconnues en matière de sécurité au travail. Il serait prudent d'installer un câble autour du terrain en cause, accompagné des avis appropriés, et de maintenir sur place un agent de sécurité 24 heures sur 24, jusqu'à ce que toutes les opérations soient terminées et que le profil original du terrain soit restauré. L'installation ou la modernisation des systèmes internes doit être effectuée avec diligence pour assurer un rendement optimal selon les plans. Il faut prendre des précautions supplémentaires pour éviter les blessures et protéger la santé des gens pendant le rechargement du frigorigène ou de la solution antigel dans la boucle souterraine.

Garantie et vie utile

Recherchez une garantie qui énonce clairement les conditions en cause et les responsabilités des intervenants. Les garanties visant les équipements peuvent être invalidées si l'entretien courant n'a pas été effectué, dans le cas par exemple des changements de filtre, et ces conditions doivent être bien comprises au départ. La période de garantie habituelle dans le cas des pompes à chaleur est d'un an pour l'ensemble de l'appareil et de cinq ans pour le compresseur. Dans le cas des garanties sur la qualité de l'installation et d'autres équipements, consultez l'entrepreneur général.

Les pompes à chaleur à eau ont une espérance de vie de 20 ans; les boucles souterraines, quant à elles, plus de 30 ans.

Entretien

Comme pour les autres systèmes commerciaux de chauffage et de refroidissement, il faut effectuer des tâches d'entretien à intervalles réguliers. Il s'agit notamment de :

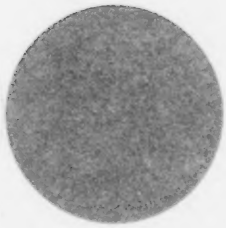
- remplacer les filtres à air;
- lubrifier les moteurs;
- remplacer les courroies de ventilateur;
- vérifier la concentration et les inhibiteurs d'antigel;
- nettoyer les échangeurs à boucle ouverte (le cas échéant);
- nettoyer les bouches d'aération et registres;
- nettoyer les conduits;
- vérifier les évents.

L'entretien de la tour de refroidissement (qui peut être très long) est éliminé, à moins qu'il s'agisse d'un système hybride.

Faits peu connus au sujet de l'entretien des systèmes

La fiabilité des systèmes géothermiques est évidente, selon une étude récente sur le service et l'entretien de 38 installations commerciales, où un total de 723 mesures correctives portant sur 2 238 pompes à chaleur ont été appliquées. Cela représente seulement 6 mesures correctives par 100 années-appareil de fonctionnement. L'âge moyen des bâtiments était de 5,6 ans. La mesure corrective la plus fréquente a été la réparation ou le remplacement du compresseur (29 p. 100 de toutes les mesures). Cela se traduit par le remplacement de seulement 1,7 p. 100 des compresseurs par an, comparativement à 3,3 p. 100 pour les systèmes classiques de pompes à chaleur sur boucle d'eau.

Partie 2
Concepts avancés



La partie 2 du présent guide explique plus en détail les questions techniques et économiques qui régissent la conception, le dimensionnement et l'installation d'un système géothermique.

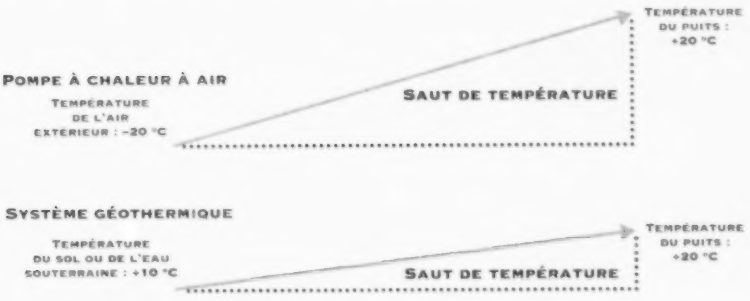
Chapitre 5 : Rendement et performance des pompes à chaleur

Sources et puits de chaleur et élévation de température

L'une des caractéristiques les plus importantes de la pompe à chaleur, c'est que le rendement de l'appareil et l'énergie nécessaire pour le faire fonctionner sont directement liés aux températures entre lesquelles elle fonctionne. Il s'agit en effet de l'écart entre la température de la source de chaleur et celle du puits où la chaleur est évacuée, qu'on appelle « saut » de température.

Plus le saut de température est faible, plus le rendement est élevé. Ce principe est important, car il est à la base du rendement élevé des pompes à chaleur géothermiques par rapport aux pompes à chaleur à air. Une pompe à chaleur à air, tout comme un climatiseur à air, doit extraire la chaleur de l'air extérieur froid en hiver et évacuer la chaleur dans l'air extérieur chaud en été. Par contraste, les pompes géothermiques extraient la chaleur d'un sol (ou de l'eau souterraine) plus chaud en hiver, et évacuent la chaleur vers le même sol (ou l'eau souterraine) relativement frais en été.

Figure 28. Écarts de température : pompe à chaleur à air et système géothermique



Saut de température plus faible = meilleur rendement (en raison de la consommation d'énergie moindre)

Par conséquent, les systèmes géothermiques, peu importe la saison, n'ont pas un saut de température aussi élevé que la pompe à chaleur à air. Il en résulte un rendement supérieur et une consommation moindre d'énergie. De plus, il faut moins d'énergie pour déplacer un liquide (dans un système géothermique) que pour déplacer de l'air (dans une pompe à chaleur à air).

Sources et puits de chaleur typiques

Comme il a été auparavant mentionné, le rendement d'une pompe à chaleur est étroitement lié aux caractéristiques de la source et du puits de chaleur. Idéalement, la source de chaleur devrait être aussi chaude et stable que possible durant la saison de chauffage, et le puits de chaleur aussi frais que possible durant la saison de refroidissement.

Dans le cas d'une pompe à chaleur, les sources et les puits communément disponibles donnent lieu à des écarts de pression typiques que le compresseur devra compenser. Plus l'écart de pression est élevé, plus élevé sera le travail requis par unité de masse de frigorigène.

Tableau 6. Températures minimales types de sources de chaleur courantes en mode chauffage

Source de chaleur	Température minimale type (°C)
Air ambiant	–30 °C à –15 °C
Eau souterraine	4 °C à 10 °C
Eau de surface	0 °C à 10 °C
Sol	4 °C à 10 °C

La pompe à chaleur qui utilise l'air à la fois comme source et puits de chaleur s'appelle « pompe à chaleur air-air » ou « pompe à chaleur à air ». La pompe à chaleur géothermique, qui transfère plutôt la chaleur à de l'eau ou à une solution antigel en mode refroidissement, est appelée généralement « pompe à chaleur eau-air » ou « pompe à chaleur à eau », selon le cas.

Évaluation du rendement d'une pompe à chaleur

Le rendement d'une pompe à chaleur se définit comme la quantité d'énergie utile produite divisée par la quantité d'énergie fournie pour accomplir cette fonction. L'énergie utile produite en chauffage par une pompe à chaleur est la somme de la chaleur extraite de la source de chaleur et de l'énergie nécessaire pour exécuter le cycle (énergie dégagée par le moteur du compresseur). Toutefois, en mode de refroidissement, l'énergie procurée par la pompe à chaleur comprend exclusivement l'énergie extraite de la source (normalement l'air de la pièce à climatiser).

On utilise le *coefficient de performance* (COP) pour définir le rendement en chauffage d'une pompe à chaleur. Le COP se définit comme le ratio de l'énergie produite en chauffage par la pompe sur l'énergie électrique requise pour produire cette chaleur. Donc, le COP global doit inclure l'énergie de pompage et de ventilation, comme il est indiqué dans l'équation suivante :

$$COP_{chauffage} = \frac{\text{Énergie de chauffage utile}}{\text{Énergie du compresseur, du ventilateur et des pompes}}$$

Exemple d'utilisation du COP

Si l'on connaît la puissance de chauffage et le COP de l'appareil, on peut évaluer son appel de puissance électrique. Par exemple, si l'appareil a une puissance de chauffage de 20 kW à un COP de 3,0, la puissance électrique serait :

20 kW / (COP de 3,0) = 6,7 kW

EER et COP

$\Rightarrow EER = COP \times 3{,}413$

On peut également se servir du COP pour décrire le rendement de refroidissement d'une pompe à chaleur. Dans ce cas, et à la différence du mode de chauffage, l'énergie requise par le compresseur et le ventilateur ne se retrouve pas incluse dans l'énergie de refroidissement utile. Il est pratique courante dans l'industrie d'exprimer le rendement énergétique en mode refroidissement par l'EER (en anglais, *energy efficiency ratio*). L'EER est l'équivalent du COP, à l'exception du fait que la chaleur extraite de la source s'exprime en Btu/h, au lieu d'en W ou en kW.

$$COP_{refroidissement} = \frac{\text{Énergie de refroidissement utile*}}{\text{Énergie du compresseur, du ventilateur et des pompes}}$$

* *Énergie de refroidissement utile = chaleur extraite de la pièce*

Exemple d'utilisation de l'EER

Si l'on connaît la puissance de refroidissement et l'EER de l'appareil, on peut évaluer son appel de puissance électrique. Par exemple, si l'appareil a une puissance totale de refroidissement de 60 000 Btu/h à un EER de 12, la puissance serait :

60 000 Btu/h / (12 Btu/h/W × 1 000 W/kW) = 5 kW

Les valeurs du COP et de l'EER des pompes à chaleur ne sont valides qu'aux conditions particulières utilisées pour les essais de performance servant à déterminer ces valeurs. Les conditions d'essais standards sont normalement moins sévères que celles rencontrées en pratique, ce qui amène des rendements d'essais plus élevés que ceux qui seront observés en pratique. De plus, les COP et les EER affichés sont habituellement calculés sans tenir compte de l'énergie de pompage. Ils servent avant tout à établir des comparaisons entre les différents appareils.

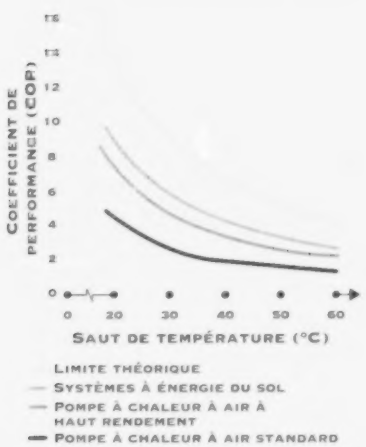
Le COP et l'EER d'une pompe à chaleur sont étroitement liés au saut de température imposé à la pompe à chaleur. Plus le saut est grand, moins l'appareil sera efficace.

Facteurs influant sur le rendement d'une pompe à chaleur

L'EER et le COP d'une pompe à chaleur dépendent de bien des facteurs, comme la température d'entrée du liquide, le débit d'eau dans l'appareil, le débit d'air et la température de l'air d'alimentation. En général, les facteurs principaux influençant le rendement sont les suivants :

- les températures de la source de chaleur et du système de distribution de la chaleur;
- la consommation d'énergie auxiliaire (pompes, ventilateurs, source de chaleur d'appoint, etc.);
- le rendement nominal de la pompe à chaleur;
- le dimensionnement de la pompe à chaleur par rapport à la demande et aux conditions de fonctionnement;
- le système de contrôle de la pompe à chaleur.

FIGURE 29. EFFET DU SAUT DE TEMPÉRATURE SUR LE RENDEMENT DES POMPES À CHALEUR



Cotes de rendement des pompes à chaleur

Les différents types de pompes à chaleur sont mis à l'essai et cotés suivant diverses normes, ce qui peut parfois porter à confusion. Les cotes de rendement de chauffage et de refroidissement doivent être utilisées uniquement pour comparer des appareils du même type (p. ex., deux pompes à chaleur à air ou deux pompes à chaleur à eau). En général, on ne peut se servir des cotes d'appareils de types différents à des fins de comparaison (p. ex., comparer une pompe à chaleur à air avec une pompe à chaleur à eau).

Au Canada, les pompes à chaleur de systèmes géothermiques doivent être cotées conformément à la norme CAN/CSA-C13256 de l'Association canadienne de normalisation (CSA). Aux États-Unis, l'American Refrigerant Institute (ARI) cote ces pompes à chaleur à l'aide de deux normes différentes. Les appareils cotés selon les normes de la CSA sont énumérés dans la publication *Energy Efficiency Directory* de la CSA. Les résultats de l'ARI sont publiés tous les six mois dans le *Directory of Certified Applied Air-Conditioning Products* (pour les pompes à chaleur de systèmes géothermiques) et dans le *Directory of Certified Unitary Products* (pompes à chaleur à air).

Tableau 7. Normes applicables aux différents types de pompes à chaleur

Type	CSA	ARI
Boucle de sol	C13256	330
À eau souterraine	C13256	325
À eau de surface	C13256	320
À air[1]	C273.31	210/2402

[1] Autonome et de puissance inférieure à 19 kW

Les conditions d'évaluation des systèmes à eau souterraine figurent dans le tableau suivant :

Tableau 8. Conditions d'essai des pompes géothermiques

Type	Norme	TLA[1] refroidissement (°C)	TLA chauffage (°C)	Norme (°C)	TLA refroidissement (°C)	TLA chauffage (°C)
À boucle de sol	C13256	25	10	ARI	25	10
À eau souterraine	C13256	10	10	ARI	21	10

[1] Température du liquide d'admission

Cotes des pompes à chaleur à air

La grande différence entre les cotes des pompes à chaleur à énergie du sol et celles des pompes à chaleur à air, c'est que ces dernières représentent des valeurs saisonnières. Elles visent à traduire le rendement total saisonnier de chauffage ou de refroidissement divisé par la puissance électrique saisonnière. On tient compte des demandes variables de chauffage et de refroidissement des températures variables de la source et du puits de chaleur sur l'année et de la demande d'énergie pour le dégivrage.

Les cotes publiées incluent l'énergie requise pour les ventilateurs. Les cotes des pompes à chaleur à eau souterraine incorporent une pondération pour la pompe, étant donné que leur charge de pompage est habituellement plus importante.

Au Canada, la réglementation fédérale en vertu de la *Loi sur l'efficacité énergétique* s'applique aux systèmes à boucle de sol et aux systèmes à eau. Elle établit le rendement minimal auquel ces produits doivent répondre pour pouvoir être importés ou fabriqués au Canada. Les rendements affichés doivent être déterminés suivant la norme CSA appropriée. Les exigences de rendement minimal actuelles des pompes à chaleur de systèmes géothermiques sont présentées au tableau 9.

TABLEAU 9. EXIGENCES DE RENDEMENT MINIMAL DES POMPES À CHALEUR DE SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES

Type	Norme	EER (refroidissement)	COP (chauffage)
Boucle de sol	C13256	10,5	2,5
À eau souterraine	C13256	11,0	3,0
À eau de surface	C13256	10,0	3,9

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES CHARGES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT ET DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

ÉVALUATION DES CHARGES DU BÂTIMENT

La conception de tout système de CVC d'un bâtiment commercial doit être effectuée par un ingénieur. Cette conception se base sur l'analyse du bâtiment dans son ensemble. Les systèmes géothermiques ne font pas exception à cette règle.

Le mauvais dimensionnement des pompes à chaleur et de la boucle souterraine constitue l'un des problèmes les plus fréquents des systèmes géothermiques. Il faut donc s'en remettre à des procédures strictes de calcul de la charge du bâtiment quand vient le temps d'effectuer le dimensionnement; on ne saurait s'en remettre à des règles générales. L'ASHRAE a établi l'une des procédures les plus reconnues et acceptées pour déterminer les charges de chauffage et de refroidissement. La norme CAN/CSA-C448.1-02 de la CSA recommande d'ailleurs d'utiliser les méthodes de calcul de charges de chauffage et de refroidissement de l'ASHRAE (*ASHRAE Handbook Fundamentals* 2001).

L'évaluation des charges des bâtiments commerciaux est un exercice complexe qui prend habituellement beaucoup de temps. Il existe un certain nombre de progiciels pour aider les concepteurs à exécuter cette évaluation. Toutefois, les conceptions préliminaires pour les petits bâtiments peuvent encore être évaluées à l'aide de calculs manuels ou de tableurs rudimentaires. Dans tous les cas, il faut savoir que l'évaluation des charges du bâtiment représente l'une des étapes les plus importantes dans la conception d'un système géothermique. De plus, vu qu'un tel système peut tirer parti de la diversité des charges d'un bâtiment, il faut évaluer les charges nettes du bâtiment complet en plus de calculer les charges de pointes de chauffage et de refroidissement de chaque zone en vue de la conception du système.

CALCUL DES CHARGES DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT

La première étape du dimensionnement consiste habituellement à calculer les charges de chauffage et de refroidissement de pointe de chaque zone, de même que les charges de pointe coïncidentes de l'ensemble du bâtiment. Il faut tenir compte des facteurs suivants dans l'exécution de ces calculs :

- Gains solaires par les fenêtres : Les fenêtres standard à double vitrage peuvent laisser entrer près de 75 p. 100 de la chaleur du rayonnement solaire, où elle devient ensuite une charge de refroidissement. Des fenêtres à vitrage teinté ou réflecteur, des éléments d'ombrage et des tentures peuvent réduire ces gains solaires.

Charge latente

« Charge latente » est le terme utilisé pour désigner l'énergie attribuable à l'injection d'humidité dans un local. L'extraction de 1 kg d'humidité exige 0,7 kW d'énergie. Cette charge entre en jeu uniquement en mode refroidissement, quand les pompes à chaleur extraient effectivement une partie de cette humidité.

- Gains de chaleur internes provenant des occupants (y compris la chaleur latente, à des fins de refroidissement) : Chaque adulte produit environ 75 W d'énergie sensible et 55 W d'énergie latente.
- Gains internes provenant de l'éclairage et des appareils : La puissance d'éclairage est souvent d'environ 20 W/m^2 dans les tours de bureaux, mais peut atteindre 40 à 50 W/m^2. La charge d'équipement (prises) est souvent de 2 à 5 W/m^2, mais elle peut être aussi élevée que 15 à 20 W/m^2.
- Charges d'air extérieur (énergie sensible et latente) provenant de la ventilation et de l'infiltration : Tous les bâtiments devraient répondre aux exigences minimales relatives à l'air extérieur imposées localement, ou les dépasser. La quantité d'air extérieur minimale est souvent tirée de la norme 62 de l'ASHRAE. La valeur habituelle du débit d'air extérieur est de 15 L/s par occupant.
- Gains ou pertes de chaleur par les fenêtres, les murs, les planchers et les toits : Ces transferts de chaleur influencent surtout la charge de chauffage, mais ils peuvent avoir un impact sur la charge de refroidissement – surtout les fenêtres. La quantité de chaleur transférée par ces composants peut être estimée à l'aide de la formule suivante :

Gain/perte de chaleur =

Superficie X (température de surface extérieure – température de surface intérieure)/valeur RSI

Des valeurs RSI types, c'est-à-dire de résistance thermique effective dans le Système international d'unités (SI), sont présentées dans le tableau 10.

TABLEAU 10. VALEURS RSI TYPES

Niveau d'isolation	Valeur RSI – murs $(m^2 \cdot °C)/W$*	Valeur RSI – toit $(m^2 \cdot °C)/W$	Valeur RSI – fenêtres $(m^2 \cdot °C)/W$
Faible	1,5	2,0	0,2
Moyen	3,0	4,0	0,3
Élevé	5,0	7,0	0,5

* Mètre carré-degré Celsius par watt.

L'utilisation des valeurs et formules très simplifiées présentées ici permet d'obtenir une estimation approximative des charges de chauffage et de refroidissement d'une zone. Voici d'autres points importants à connaître au sujet du calcul de la charge :

- La charge de chauffage de pointe doit être calculée sans tenir compte des occupants et des gains internes, puisqu'elle se produit habituellement la nuit.
- Les charges de zone se calculent en tenant compte des gains (p. ex., solaires) ou des pertes (pour le chauffage) thermiques en période de pointe seulement.

- Les charges de pointe de refroidissement de chaque zone peuvent survenir à des moments différents. Toutefois, pour le calcul manuel des charges de refroidissement des zones, on considère habituellement le jour le plus chaud de l'été à trois heures différentes. Les charges calculées les plus élevées sont retenues comme étant les charges de pointe de la zone.
- Les charges de chauffage ne sont évaluées qu'à la température de chauffage de conception, c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte des gains solaires ou des gains internes. Toutefois, étant donné que certaines zones au centre d'un bâtiment peuvent exiger du refroidissement en permanence, il se peut que l'on doive tenir compte des gains internes dans ces zones, même dans des conditions hivernales de calcul.
- Les charges nettes se calculent en tenant compte des charges de toutes les zones. L'heure où se produisent les charges nettes de pointe peut être différente de celle de la charge de pointe d'une ou de toutes les zones. L'établissement précis de l'heure de la charge nette maximale exige soit des calculs manuels exhaustifs ou, de façon plus réaliste, une simulation informatique horaire. On peut estimer que la charge nette de refroidissement correspond approximativement à la plus élevée des sommes des charges de zone pour l'une des trois heures utilisées dans les calculs des charges de pointe des zones.
- Les températures de conception doivent être obtenues d'une source fiable, comme l'*ASHRAE Handbook Fundamentals* 2001.

Les valeurs types pour la charge de chauffage du bâtiment varient de 20 à 120 W/m^2. La charge de refroidissement varie en général de 50 W/m^2 dans le cas des bâtiments situés dans des climats frais et sujets à des gains internes réduits, jusqu'à 200 W/m^2 et plus dans le cas des bâtiments commerciaux situés dans des climats chauds et sujets à des gains internes élevés.

Pour réaliser un calcul approfondi des charges de zone et de l'ensemble du bâtiment, il faut employer l'une des trois méthodes suivantes présentées dans le manuel de l'ASHRAE :

- Méthode de la fonction de transfert (MFT) : Il s'agit de la plus complexe des méthodes proposées par l'ASHRAE, et elle nécessite un programme informatique ou un tableur sophistiqué.
- Écart de température de la charge de refroidissement/Facteurs de charge de refroidissement (ETCR/FCR) : Cette méthode est dérivée de la MFT. Elle fait appel à des données totalisées pour simplifier le calcul, et peut être facilement appliquée à l'aide d'une série de tableurs simples, mais elle est sujette à certaines limites dues au recours à des données totalisées.

- Écart de température équivalent total/moyenne temporelle (ETET/MT) : C'était la méthode privilégiée pour le calcul manuel ou à l'aide de tableurs simples avant l'introduction de la méthode ETCR/FCR.

Ces trois méthodes sont bien documentées dans l'*ASHRAE Handbook Fundamentals* 2001. Pour concevoir un système géothermique, la méthode utilisée pour obtenir les charges de zone et nettes doit toujours être documentée pour en assurer la justesse et l'applicabilité.

Calcul de la consommation d'énergie

Le rendement à long terme des systèmes géothermiques peut être influencé par la quantité d'énergie rejetée en mode refroidissement comparativement à celle extraite en mode chauffage. S'il existe un grand déséquilibre entre ces valeurs sur une base annuelle, le rendement de la boucle souterraine peut s'en trouver réduit, et la conception doit tenir compte de ce fait. Pour évaluer les transferts d'énergie vers le sol et en provenance du sol, il faut calculer la consommation annuelle d'énergie. Dans le cas d'un bâtiment commercial, ce type de calcul peut rarement, sinon jamais, donner une estimation fiable s'il est effectué manuellement. Quelques méthodes simplifiées sont encore utilisées aujourd'hui pour obtenir des chiffres très approximatifs, mais il faut prendre garde de ne pas trop s'y fier vu leur approche très simplifiée.

Les calculs de consommation énergétique peuvent être effectués à l'aide de l'une des trois méthodes de base suivantes :

- Méthode des degrés-jours : Cette procédure simple exige de connaître uniquement deux paramètres pour évaluer la consommation annuelle d'énergie. Sa justesse et sa précision sont très limitées dans le cas des bâtiments commerciaux. On peut en tirer des estimations générales, mais on ne peut guère s'en servir dans des procédures d'évaluation, même au niveau de la préfaisabilité. Son utilisation se limite au secteur résidentiel.
- Méthode des BIN : Elle représente la meilleure façon d'obtenir des estimations rapides de la consommation annuelle d'énergie. La méthode tient compte du changement de température extérieure et des conditions de charge partielle. On peut l'automatiser facilement dans un tableur et s'en servir pour traiter des bâtiments à zones multiples. Le calcul manuel est envisageable pour des bâtiments de type résidentiel, mais il est plus difficile dans le cas des bâtiments commerciaux.

- Méthode horaire : Il s'agit de l'une des méthodes les plus avancées pour effectuer des calculs de consommation annuelle d'énergie. Bien qu'étant la meilleure méthode, elle est cependant la plus complexe. Il existe beaucoup de programmes commerciaux pour exécuter une simulation horaire; l'un des mieux connus est DOE2 (et ses dérivés). Il faut faire très attention lorsqu'on exécute une simulation horaire détaillée. Les interfaces logicielles faciles à utiliser n'empêchent pas que l'on doive procéder à une validation complète des données d'entrée et à la vérification des sorties. La validité des résultats, même avec le modèle de simulation horaire le plus perfectionné, dépend dans une grande mesure d'une bonne utilisation, plutôt que de ses diverses fonctions.

Le chapitre « Energy Estimating Methods » de l'*ASHRAE Handbook Fundamentals* 2001 décrit en détail ces méthodes et comprend des exemples.

En général, les bâtiments commerciaux au Canada consomment entre 100 et 400 kWh/m^2/an.

Chapitre 7 : Dimensionnement des pompes à chaleur et des boucles souterraines

Dimensionnement des pompes à chaleur

Dès que l'on connaît les charges de refroidissement et de chauffage, il faut prendre une décision concernant le choix du critère de dimensionnement des pompes à chaleur : celles-ci doivent-elles être dimensionnées selon la charge de chauffage ou la charge de refroidissement?

Une ligne directrice de conception courante touchant les pompes à chaleur veut que la puissance de refroidissement ne dépasse pas 125 p. 100 de la charge de refroidissement sensible de pointe. Sinon, la déshumidification peut être inadéquate, et cela peut compromettre le confort des occupants. Le recours à plusieurs compresseurs ou à des ventilateurs à vitesse variable pourrait contribuer à contourner cette limite. Il faut que les pompes à chaleur soient dimensionnées en fonction d'une puissance de refroidissement sensible qui se situe dans une marge de 10 p. 100 de la charge sensible des locaux. Dans les cas où la charge de chauffage domine de beaucoup la charge de refroidissement, le préconditionnement de l'air extérieur pourrait contribuer à équilibrer ces charges. Dans de tels cas, il faut dimensionner la boucle souterraine suivant les charges auxquelles devront répondre les pompes à chaleur, et non les charges totales. En réduisant l'écart entre les charges de chauffage et de refroidissement, le préconditionnement de l'air extérieur pourrait également contribuer à réduire le besoin de recourir à des systèmes hybrides. Comme dans d'autres industries, les connaissances et les méthodes de conception évoluent avec le temps. D'autres méthodes et principes de conception sont disponibles et offrent des résultats adéquats. L'acheteur devrait donc consulter un concepteur spécialisé pour obtenir plus d'information.

L'humidité

Les pompes à chaleur des systèmes géothermiques sont souvent conçues pour fonctionner avec un rapport de puissance sensible (RPS) de 0,75. Ce RPS se définit comme étant le ratio de la puissance de refroidissement sensible et de la puissance totale.

Un RPS d'environ 0,75 est suffisant pour maintenir des niveaux d'humidité appropriés (c.-à-d. répondre à la charge latente) dans la plupart des régions canadiennes.

En général, pour évaluer les charges de refroidissement, il faut vérifier le RPS de la zone. Cette valeur doit être égale ou supérieure au RPS de la thermopompe.

Préconditionnement de l'air extérieur

Si la température de l'air d'alimentation des pompes à chaleur (après le mélange avec l'air extérieur) peut descendre sous 10 °C, il est recommandé de préchauffer l'air extérieur. De plus, comme il a été mentionné, il peut être préférable de préchauffer l'air extérieur pour éviter de grands déséquilibres entre les charges de chauffage et de refroidissement. Il existe plusieurs façons de préconditionner l'air extérieur. Voici les options les plus courantes :

- Ventilateur récupérateur de chaleur (VRC) ou ventilateur à récupération totale : Le VRC représente un moyen éconergétique de préchauffer l'air extérieur. Il extrait une partie de la chaleur de l'air d'évacuation pour préchauffer l'air extérieur. Le ventilateur à récupération totale

Les ventilateurs récupérateurs de chaleur dans les climats froids

Dans les régions froides, les ventilateurs récupérateurs de chaleur peuvent nécessiter un chauffage d'appoint, habituellement de source électrique, pour veiller à ce que l'air d'alimentation ne se refroidisse pas au-dessous de 10 °C par temps très froid. De plus, dans ces régions, un mécanisme de dégivrage est habituellement requis dans les VRC.

n'échange pas seulement de la chaleur entre l'air d'évacuation et l'air frais, mais également de l'humidité. Dans les climats humides, cela réduit la charge latente que subissent les pompes à chaleur. Dans les climats froids, cela réduit les besoins d'humidification.

- Pompes à chaleur eau-eau : Une autre option qui s'intègre bien dans un système géothermique est une pompe à chaleur eau-eau spécialisée pour préconditionner l'air extérieur. Cette pompe à chaleur peut chauffer et refroidir l'air extérieur, et peut donc également contribuer à réduire la charge latente en mode refroidissement.
- Sources de chaleur classiques : Le préchauffage peut être effectué par des radiateurs électriques standard, l'eau chaude ou la vapeur. Ces options sont moins éconergétiques que les deux précédentes, mais elles pourraient faire partie de la conception d'ensemble la plus économique.
- Autres systèmes de récupération : Il existe bien d'autres types de systèmes de récupération de la chaleur qui peuvent jouer le même rôle qu'un VRC. Les caloducs et les pompes à chaleur air-air, situés entre les débits d'air extérieur et d'air évacué, peuvent notamment être utilisés.

Dimensionnement de la boucle souterraine

La conception d'une boucle souterraine s'apparente de bien des façons à celle d'un échangeur de chaleur classique : la charge qui y est imposée détermine les dimensions nécessaires. Pour des conditions de sol données, la charge du bâtiment (refroidissement ou chauffage) est le facteur principal qui influe sur la taille de la boucle souterraine. Toutefois, la dimension finale de la boucle est déterminée par des choix de conception, tout comme c'est le cas pour un échangeur classique. Lors du dimensionnement d'un échangeur standard, les températures d'entrée et de sortie et les débits sont habituellement tous déterminés par le concepteur. La dimension finale dépend donc des exigences du concepteur en ce qui concerne la température des liquides qui sortent de l'échangeur de chaleur. Ce même principe s'applique également à la boucle souterraine : la dimension finale est déterminée par les exigences en ce qui a trait aux températures minimales ou maximales permises à la sortie de l'échangeur durant l'année.

Cependant, dans le cas de l'échangeur souterrain, la plage de valeurs acceptables de températures de sortie maximale et minimale est limitée. Des contraintes pratiques, surtout en ce qui concerne les pompes à chaleur, tendent à simplifier cette décision. Par exemple, pour les pompes à chaleur à plage de température élargie, la température minimale recommandée de liquide d'entrée est habituellement de –6 °C, et la température maximale de 43 °C, les valeurs utilisées principalement se situant dans la gamme de 27 à 32 °C. Des conceptions particulières pourraient leur permettre de fonctionner au-dessous ou au-dessus de ces températures, mais cela serait exceptionnel.

Un concepteur peut faire varier ces valeurs pour minimiser les coûts initiaux par rapport au rendement. Habituellement, plus la température minimale acceptée à la sortie de la boucle souterraine est élevée, plus le rendement annuel du système est élevé. Toutefois, la boucle correspondante sera plus longue et le coût initial plus élevé. Cela s'applique également aux valeurs plus basses pour la température de sortie maximale.

Voici d'autres facteurs qui influencent la longueur d'un échangeur souterrain :

- le type et les propriétés du liquide que l'on fait circuler;
- la disposition physique de la boucle (les distances entre les trous de forage et entre les fossés);
- la profondeur des trous de forage et des tranchées;
- le transfert annuel net d'énergie au sol;
- la configuration de l'échangeur, à savoir à un ou deux tuyaux horizontaux, en série ou parallèles;
- la température moyenne du sol;
- les propriétés du sol (et du coulis, le cas échéant);
- les conditions hydrogéologiques locales (le déplacement de l'eau dans le sol);
- le diamètre du tuyau et le débit, pour connaître la turbulence dans le tuyau à des températures de fonctionnement extrêmes;
- le rendement de la pompe à chaleur et la consommation d'énergie pour le pompage.

Espacement des tuyaux

Lorsqu'on conçoit une boucle souterraine, la superficie du terrain est importante. La superficie requise n'est pas seulement dictée par la longueur totale de l'échangeur souterrain, mais également par l'espace minimal entre les trous de forage ou les tranchées. Des valeurs types sont présentées dans le tableau suivant. Ces valeurs ne doivent être considérées qu'à l'étape des estimations préliminaires, car les valeurs réelles varieront d'un projet à l'autre.

TABLEAU 11. DISTANCES TYPES SÉPARANT LES TROUS DE FORAGE ET LES TRANCHÉES

Type d'aménagement de la boucle	Espacement des trous de forage (m)	Espacement des tranchées (m)
Standard	6,0	4,0
Minimum recommandé	4,5	1,5

Bien qu'un espacement plus serré réduise la superficie de terrain requise, il a pour effet d'augmenter la longueur totale requise de l'échangeur souterrain. De plus, le déséquilibre thermique à long terme (charges de refroidissement plus grandes que les charges de chauffage ou vice versa) affecte beaucoup plus le rendement des échangeurs à espacement réduit. S'il existe une grande différence entre les charges de chauffage et de refroidissement, les effets à long terme sur des aménagements non standard doivent être étudiés de façon approfondie. Il existe des outils de conception spécialisés pour effectuer ce type d'analyse (voir le site Web à http://www.ghpc.org).

RÈGLES APPROXIMATIVES DE DIMENSIONNEMENT DES BOUCLES VERTICALES

On peut établir des estimations initiales pour une boucle verticale par le biais de règles simplifiées de dimensionnement, ou en faisant appel à des formules empiriques pour des systèmes types. La dimension calculée à l'aide de ces règles approximatives peut servir à obtenir des estimations préliminaires pour la longueur requise et le coût de la boucle. Toutefois, ces méthodes très simplifiées ne tiennent pas compte des propriétés spécifiques du sol, des déséquilibres thermiques à long terme ou des autres facteurs qui influent sur la dimension finale et qui sont propres à chaque projet. Donc, il faudrait y recourir uniquement pour donner une estimation grossière. Beaucoup d'outils d'évaluation offerts par des organismes publics ou des entreprises privées permettent une estimation plus précise de la dimension requise. Il faut toujours utiliser ces outils ou encore consulter un concepteur d'expérience, lorsqu'un projet va au-delà des simples estimations préliminaires.

Une règle d'estimation simple est disponible dans le *Commercial/ Institutional GSHP Engineering Manual* 1995 de l'ASHRAE. Cette méthode est basée sur la quantité d'énergie nette extraite du sol à des fins de chauffage, ou transférée au sol au cours de la saison de refroidissement. Le concepteur doit choisir entre une conception basée sur les besoins de chauffage du bâtiment ou ses besoins de refroidissement. L'estimation de la dimension d'une boucle verticale par cette méthode, pour une conception basée sur les charges de refroidissement, présuppose l'utilisation de tuyaux de 31,8 mm de diamètre. Il est important d'insister sur les limites de ces méthodes simplifiées dans le cas de systèmes géothermiques commerciaux. On ne devrait y recourir exclusivement que pour des estimations très préliminaires. Il est fortement recommandé de consulter les manuels de référence susmentionnés pour vérifier l'applicabilité des règles approximatives suivantes :

$$\text{Longueur pour le refroidissement (en mètres)} = 0{,}05105 \times \frac{\text{Quantité annuelle d'énergie rejetée dans le sol (MJ)}}{\text{Température maximale d'entrée du liquide (°C)} - \text{Température du sol en profondeur (°C)}}$$

L'estimation de la dimension d'une boucle verticale pour une conception basée sur les données sur le chauffage est :

$$\text{Longueur pour le chauffage (en mètres)} = 0{,}05506 \times \frac{\text{Quantité annuelle d'énergie extraite du sol (MJ)}}{\text{Température en profondeur (°C)} - \text{Température minimale d'entrée du liquide (°C)}}$$

Ces estimations de longueur peuvent varier beaucoup suivant plusieurs paramètres, le plus important étant les conditions de sol. Par conséquent, dans les sols qui ont des propriétés thermiques médiocres (comme la plupart des sols riches en argile), la longueur prévue peut doubler.

Les estimations préliminaires concernant la quantité d'énergie qui est extraite du sol et qui y est transférée peuvent s'obtenir à partir des charges nettes de pointe de refroidissement et de chauffage du bâtiment et des estimations du nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance des systèmes.

Chaleur extraite du sol = Charge de chauffage de pointe X CCE_{ch} X $(COP_{ch} - 1)/COP_{ch}$

Chaleur évacuée dans le sol =
Charge de refroidissement de pointe X CCE_{retr} X CCE_{reh} X $(1 + COP_{retr})/COP_{retr}$

Ces formules incluent une variable pour le rendement annuel moyen de la pompe à chaleur. Cette valeur est nécessaire puisque la chaleur produite par le moteur du compresseur est également évacuée dans le sol, en plus de la charge du bâtiment, pendant la saison de refroidissement, tandis que cette même chaleur compense une partie de la charge du bâtiment durant la saison de chauffage.

Ces formules simples de transfert de chaleur entre le sol et le bâtiment peuvent être remplacées par de meilleures estimations si une modélisation détaillée du bâtiment a été effectuée à l'aide d'outils de simulation.

D'autres approximations encore plus simples pour obtenir un ordre de grandeur de la dimension d'une boucle verticale sont basées uniquement sur les charges nettes du bâtiment, et sur une indication générale quant à son emplacement.

TABLEAU 12. RÈGLES APPROXIMATIVES DE DIMENSIONNEMENT D'UNE BOUCLE VERTICALE

Diamètre nominal des tuyaux	Régions à climat froid d'Amérique du Nord (m/kW de charge)	Régions à climat tempéré d'Amérique du Nord (m/kW de charge)
3/4 po et 1 po – plage de longueurs types	26	52
1 po à 2 po – plage de longueurs types	17	39

Source : *Commercial/Institutional GSHP Engineering Manual*, ASHRAE, 1995.

Exemple de calcul de dimensionnement : boucle verticale

Un bâtiment possède une charge de refroidissement nette de pointe de 100 kW et une charge de chauffage nette de pointe de 84 kW. Ce bâtiment est situé à Halifax (Nouvelle-Écosse). Ses propriétaires souhaitent avoir une idée approximative de la dimension de la boucle souterraine, s'ils devaient installer un système géothermique.

Les données de température locale indiquent que la température annuelle moyenne à Halifax est 9 °C. Il s'agit là d'une bonne estimation pour connaître la température du sol en profondeur. D'après leurs factures actuelles d'énergie, les propriétaires estiment que le nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance du système de refroidissement est d'environ 1 100 h, et que celui du chauffage est de 2 200 h. On considère que le coefficient de performance (COP) moyen de refroidissement des systèmes verticaux typiques est de 3,5 et de 2,5 en mode chauffage. La quantité annuelle d'énergie qui serait alors extraite du sol et évacuée dans le sol serait comme suit :

Énergie évacuée = 100 kW X 1 100 h X (1 + 3,5)/3,5
= 141 429 kW X 3,6 MJ/kWh
= 509 144 MJ

Énergie extraite = 84 kW X 2 200 h (2,5 – 1)/2,5
= 110 880 kWh X 3,6 MJ/kWh
= 399 168 MJ

Puisqu'il s'agit d'une estimation préliminaire pour ce bâtiment, les valeurs types de température d'entrée du liquide sont utilisées (minimum de 1,7 °C et maximum de 29,4 °C).

Les estimés pour la longueur de la boucle souterraine pour le chauffage et le refroidissement se présentent comme suit :

Longueur pour le refroidissement = 0,05105 X 509 144/(29,4 – 9)
= 1 274 m

Longueur pour le chauffage = 0,05506 X 399 168/(9 – 1,7)
= 3 011 m

La longueur nécessaire de la boucle pour le chauffage est beaucoup plus élevée dans ce cas, en raison de la température relativement basse du sol en profondeur. On pourrait ramener cette longueur à 1 998 mètres si la température d'entrée minimale était réduite à –2 °C. Cela, toutefois, réduirait le rendement général du système. On ne peut toutefois établir facilement le rendement réel et sa variation en fonction de la longueur de l'échangeur. Si cette première approximation se situe dans des limites

Facteur de charge partielle

Le calcul de dimensionnement d'une boucle horizontale à l'aide des formules exige l'évaluation du facteur de charge partielle du bâtiment du mois de calcul. Le facteur de charge partielle représente la fraction du nombre d'heures équivalentes pleine charge durant le mois de calcul, par rapport au nombre total d'heures dans ce mois. On peut l'évaluer comme suit :

$$FCP_{m} = \frac{\sum \text{Charge du bâtiment} \times \text{heures}}{\text{Charge de pointe} \times \text{N}^{\text{bre}} \text{ d'heures dans le mois}}$$

Le FCP est évalué pour les mois de calcul de refroidissement et de chauffage, habituellement juillet et janvier (respectivement) dans l'hémisphère Nord.

raisonnables pour les propriétaires, une étude de préfaisabilité détaillée devrait alors être considérée pour tenir compte de paramètres tels les changements de COP selon la variation de la longueur de la boucle souterraine. Un autre aspect intéressant de la conception de la boucle souterraine sur la base des charges de chauffage est le suivant : la dimension de la boucle augmente lorsque les pompes à chaleur sont plus efficaces. Ce phénomène est dû au fait que moins de chaleur est produite par les compresseurs des pompes à chaleur efficace et que, en conséquence, le sol doit en fournir plus. Si le COP de chauffage dans l'exemple était de 3,5 au lieu de 2,5, la longueur requise serait de 3 584 m, au lieu de 3 011 m. Le choix d'une solution économique optimale exige donc une approche bien planifiée.

L'évaluation de la dimension de la boucle souterraine à partir des règles approximatives présentées dans le tableau précédent amènerait les estimés suivants :

Longueur (charge de refroidissement)	= 100 kW X 17 ou 26 = 1 700 à 2 600 m
Longueur (charge de chauffage)	= 84 kW X 17 ou 26 = 1 428 à 2 184 m

Les différences entre les dimensions résultant des équations et celles provenant du tableau sont une bonne indication des variations possibles des estimations de la taille de la boucle souterraine selon des règles approximatives. Dans ce cas, les propriétaires pourraient estimer à environ 2 100 mètres la longueur d'une boucle convenant à leur bâtiment en vertu d'un ensemble donné de choix de calculs (à savoir, la température de l'eau à l'entrée, le rendement de la pompe à chaleur).

Règles approximatives de dimensionnement des boucles horizontales

Contrairement aux boucles verticales, les boucles souterraines horizontales subissent une fluctuation de température du fait qu'elles sont situées à une faible profondeur. Leur dimensionnement doit donc tenir compte de ce facteur supplémentaire. Des formules simplifiées peuvent également être utilisées dans le cas des boucles horizontales pour procéder à des estimations initiales, ou l'utilisation de règles approximatives peuvent suffire pour obtenir ces estimés. Toutefois, comme pour les boucles verticales, ces estimations sont soumises à un niveau élevé d'incertitude, et devraient toujours être traitées avec beaucoup de prudence.

Une méthode simple de dimensionnement des boucles horizontales est présentée dans la publication *Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Installation Guide* (Université Oklahoma State, 1988). On peut simplifier davantage cette méthode en choisissant une résistance approximative des tuyaux de 51 (m^2·°C/kW) afin de pouvoir s'en remettre à des estimations générales (charges en kW).

$$\text{Longueur pour le chauffage} = \frac{\text{Charge de chauffage} \times [(COP_{ch} - 1)/COP_{ch}] \times (51 + R_{sol} \times FCP_{ch})}{\text{Température minimale du sol} - \text{Température d'entrée minimale}} \quad \text{(en mètres)}$$

$$\text{Longueur pour le refroidissement} = \frac{\text{Charge de refroidissement} \times [(COP_{refr} + 1)/COP_{refr}] \times (51 + R_{sol} \times FCP_{refr})}{\text{Température d'entrée maximale} - \text{Température maximale du sol}} \quad \text{(en mètres)}$$

Les termes dans ces équations sont semblables à ceux des systèmes verticaux, mais il faut évaluer quelques autres paramètres, notamment :

- la résistance thermique du sol, R_{sol} (en m^2·°C/kW);
- la température minimale ou maximale du sol (°C);
- les facteurs de charge partielle (FCP) des mois de calcul.

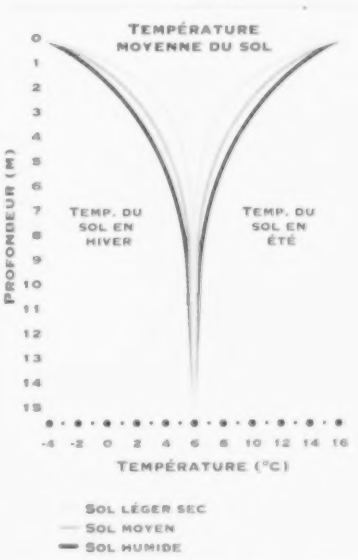
La résistance thermique du sol est une indication de la quantité d'énergie que l'on peut y transférer. Une valeur élevée indique qu'il faudra une plus grande longueur de tuyau pour évacuer ou absorber une quantité donnée d'énergie. Les conditions de sol et la disposition de la boucle (système à un tuyau par rapport à deux tuyaux superposés) ont également un effet sur cette résistance. Des valeurs types correspondant à une disposition courante et une condition de sol moyenne (sol compacté sec ou sol léger humide) sont présentées au tableau 13.

TABLEAU 13. RÉSISTANCE TYPE DU SOL (EN M^2·°C/KW)

Système à un tuyau	Système à deux tuyaux superposés	Système à quatre tuyaux (2x2)
742	970	1369

Comme pour la température moyenne du sol en profondeur, il est possible de baser une première estimation de la température minimale du sol sur la température moyenne de l'air durant la saison de chauffage (d'octobre à mars); de la même manière, on peut estimer la température maximale du sol en fonction de la température moyenne de l'air durant la saison de refroidissement (d'avril à septembre). Des estimations plus précises qui tiennent compte de la profondeur des tuyaux et des conditions de sol peuvent être calculées à partir d'une formule analytique. D'autre part, le schéma à la droite peut servir à déterminer les températures minimales et maximales, en fonction de la température annuelle moyenne, à n'importe quelle profondeur.

FIGURE 30. VARIATION DE LA TEMPÉRATURE DU SOL (°C)



Source : *Closed-Loop/Ground-Source Heat Pump Systems: Installation Guide*, Oklahoma State University, 1988.

Les règles approximatives concernant une boucle horizontale sont présentées au tableau 14.

Configuration	Régions à climat froid d'Amérique du Nord	Régions à climat tempéré d'Amérique du Nord
Un tuyau	30	30
Deux tuyaux	43	74
Quatre tuyaux	52	87
Six tuyaux	65	104

Source : *Commercial/Institutional Ground-Source Heat Pump Engineering Manual*, ASHRAE, 1995.

EXEMPLE DE CALCUL DE DIMENSIONNEMENT : BOUCLE HORIZONTALE

Des propriétaires d'un bâtiment à Halifax (Nouvelle-Écosse) ont estimé la dimension d'une boucle souterraine verticale et veulent désormais obtenir des estimations semblables pour une boucle horizontale. Ils ont déjà évalué les températures souterraines pour la disposition de leur boucle horizontale. Le bâtiment possède une charge de refroidissement nette de pointe évaluée à 100 kW et une charge de chauffage nette de pointe de 84 kW.

D'après des factures d'énergie actuelles, les propriétaires estiment que le nombre d'heures de fonctionnement équivalent à pleine puissance du système de refroidissement est d'environ 1 100 h, et que celui du chauffage est de 2 200 h. Le COP de refroidissement moyen type des systèmes à boucle horizontale est considéré comme étant 3,5 en mode refroidissement et 2,5 en mode chauffage. Les propriétaires estiment que les facteurs de charge partielle (FCP) des mois de calcul (l'été et l'hiver) sont environ le double de la moyenne annuelle, comme suit :

FCP_{refr} = 1 100 h/8 760 h X 2
= 0,252

FCP_{ch} = 2 200 h/8 760 h X 2
= 0,502

Comme il s'agit d'un premier estimé d'un système géothermique pour ce bâtiment, les valeurs de température d'entrée du liquide types sont utilisées (minimum de –1 °C et maximum de 29,4 °C). La résistance du sol est évaluée à 51.

Les longueurs de la boucle souterraine pour le chauffage et le refroidissement se présentent donc comme suit :

Longueur pour le refroidissement = {100 kW X [(3,5 + 1)/3,5 X (51 + 970 X 0,252)]}/(29,4 – 14,2 °)
= 2 500 m de tuyau ou 1 250 m de tranchée

Longueur pour le chauffage = 84 kW X (2,5 – 1)/2,5 X (51 + 970 X 0,502)/[3,8 –(– 1)°°]
= 5 648 m de tuyau ou 2 824 m de tranchée

° 14,2 °C = température maximale du sol
°° -1 °C = température minimale du sol

La longueur pour le chauffage est encore une fois beaucoup plus grande que celle pour le refroidissement à cause de la faible température minimale du sol. Cette longueur serait ramenée à 3 583 m si la température minimale d'entrée du liquide était réduite à –3,9 °C (la limite de température inférieure de l'équipement). Cela, toutefois, réduirait le rendement général du système. On ne peut toutefois établir facilement le rendement réel et sa variation en fonction de la longueur de l'échangeur. Si cette première approximation se situe dans des limites raisonnables pour les propriétaires, une étude de préfaisabilité détaillée devrait alors être considérée pour tenir compte de paramètres tels les changements de COP selon la variation de la longueur de la boucle souterraine. Comme dans le cas de la boucle verticale, la longueur requise pour le chauffage augmentera pour les pompes à chaleur plus efficaces, et le choix de la solution optimale sur le plan économique exige une analyse de sensibilité.

En évaluant la dimension de la boucle à l'aide de règles approximatives simples présentées au tableau 14, on obtient les estimations générales suivantes :

Longueur (charge de refroidissement) = 100 kW X 43
= 4 300 m

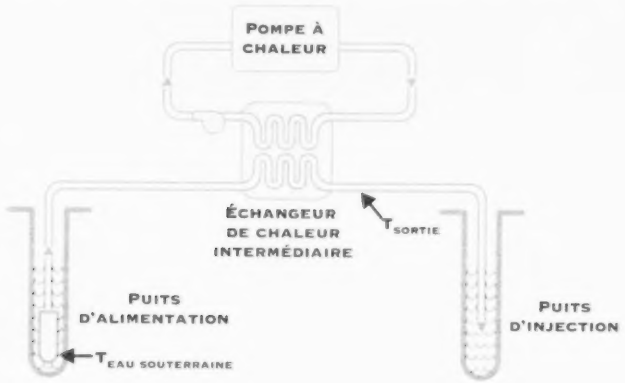
Longueur (charge de chauffage) = 84 kW X 43
= 3 612 m

Encore une fois, les différences entre les dimensions résultant des équations et celles provenant du tableau sont une bonne indication des variations possibles des estimations de la taille de la boucle souterraine selon des règles approximatives. Dans le présent cas, les propriétaires pourraient estimer que la longueur convenable d'une boucle horizontale se situerait à environ 4 000 m selon un ensemble précis de paramètres de calculs (la température de l'eau d'entrée, les rendements des pompes à chaleur et la configuration).

Règles approximatives de dimensionnement des boucles à eau souterraine

Le système à eau souterraine présenté ici fait appel à un échangeur de chaleur intermédiaire pour séparer la boucle du bâtiment et l'eau souterraine. Cela est nécessaire quand le liquide de la boucle du bâtiment n'est pas de l'eau; on le recommande aussi dans bien des cas pour prévenir les dommages à l'échangeur de chaleur des pompes à chaleur, à cause de l'entartrage ou de la corrosion dus à l'eau souterraine. Les échangeurs de chaleur intermédiaires sont également appréciés comme moyens de protéger la qualité de l'eau souterraine, puisqu'ils isolent la boucle souterraine des pompes à chaleur et des circuits de frigorigène.

FIGURE 31. POMPE À CHALEUR À EAU SOUTERRAINE — SYSTÈME INDIRECT



Le débit d'eau souterraine requis dépend de la température de cette eau et de l'efficacité de l'échangeur de chaleur de la boucle du bâtiment. Il est possible d'évaluer, de façon préliminaire, le débit d'eau souterraine requis en se basant sur une température d'approche de 3 °C entre l'eau souterraine et le liquide de la boucle du bâtiment à la sortie de l'échangeur intermédiaire. La température de l'eau souterraine demeure relativement constante l'année durant. En général, elle est à peu près égale à la température annuelle moyenne de l'air dans la région.

On peut évaluer le débit d'eau souterraine selon le plus élevé du débit en refroidissement ou du débit en chauffage à l'aide des formules suivantes (charges en kW) :

$$\text{Débit en chauffage (en L/s)} = \frac{\text{Charge de chauffage nette}}{4{,}18 \times (T_{\text{eau souterraine}} - T_{\text{sortie}})} \times \frac{(COP_{ch} - 1)}{COP_{ch}}$$

$$\text{Débit en refroidissement (en L/s)} = \frac{\text{Charge de refroidissement nette}}{4{,}18 \times (T_{\text{sortie}} - T_{\text{eau souterraine}})} \times \frac{(COP_{refr} + 1)}{COP_{refr}}$$

Pour calculer les débits, il faut évaluer la température de l'eau souterraine à sa sortie de l'échangeur de chaleur intermédiaire (T_{sortie}). Cette température dépend de la température à l'entrée choisie aux fins de la conception ainsi que du débit d'eau de la boucle du bâtiment et des valeurs de rendement des pompes à chaleur.

On peut estimer les valeurs de T_{sortie} en utilisant un débit type pour la boucle du bâtiment de 0,054 L/s/kW, qui est la valeur recommandée par plusieurs fabricants de pompes à chaleur à eau souterraine.

Chauffage : $T_{sortie} = T_{eau\ souterraine} - 5\ °C$

Refroidissement : T_{sortie} = *Température maximale d'entrée en été* + 2 °C

La température maximale d'entrée en été utilisée dans l'équation précédente représente la température maximale de la boucle du bâtiment à l'entrée des pompes à chaleur.

Les valeurs du débit d'eau souterraine sont habituellement de 0,05 L/s/kW ou moins.

Exemple de calcul de dimensionnement : boucle à eau souterraine

Des propriétaires d'un bâtiment à Halifax ont estimé la dimension de boucles souterraines verticale et horizontale, mais aimeraient évaluer le débit requis s'ils devaient choisir un système à eau souterraine. Leur bâtiment a une charge de refroidissement nette de pointe estimative de 100 kW, et une charge de chauffage nette de pointe de 84 kW.

La température du sol à Halifax est évaluée à 9 °C. Les propriétaires choisissent une température maximale d'entrée en été aux pompes à chaleur de 24 °C. Ils utilisent des COP estimés de 4,0 en mode refroidissement et de 3,0 en mode chauffage. On peut alors estimer le débit d'eau souterraine pour les deux charges comme suit :

Chauffage : T_{sortie}	= 9 – 5 °C = 4 °C
Débit en chauffage :	= 84/4,18/(9 – 4) X (2/3) = 2,68 L/s
Refroidissement : T_{sortie}	= 24 °C + 2 °C = 26 °C
Débit en refroidissement :	= 100/4,18/(26 – 9) X (5/4) = 2,0 L/s

Le débit d'eau souterraine en chauffage est plus élevé que le débit en refroidissement. En abaissant la température minimale du liquide à l'entrée, on pourrait réduire la différence, mais cela aurait également pour effet d'abaisser le rendement du système.

Chapitre 8 : Investir dans un système géothermique

Critères d'investissement

Trois des critères les plus utilisés pour évaluer un investissement sont : la période de récupération simple, la valeur actualisée nette et le taux de rendement interne. Ce sont trois notions différentes qu'il ne faut pas confondre.

Période de recouvrement de l'investissement

La période de recouvrement de l'investissement (PRI) est de loin l'indicateur financier le plus simple et le plus fondamental. Il indique le potentiel de risque d'un projet et le degré de récupération à court terme du coût des immobilisations. Toutefois, il ne tient pas compte des diverses économies ou dépenses qui se produisent après la période de recouvrement, et ne considère pas le coût d'emprunt des capitaux nécessaires ou les revenus qui seraient tirés en investissant ces argents. La PRI est calculée comme étant le ratio du coût supplémentaire que représente l'installation d'un système géothermique, aux économies annuelles qu'il rapportera. Beaucoup de projets en géothermie présentent des PRI entre 4 et 6 ans mais offrent des résultats encore plus intéressants lorsque le rendement financier sur le cycle de vie du système est considéré.

Valeur actualisée nette

Le mot « nette » dans l'expression « valeur actualisée nette » (VAN) indique que celle-ci tient compte des coûts initiaux de même que des économies ou des pertes ultérieures attribuables au système géothermique, y compris les coûts d'entretien durant toute la vie utile du système. La VAN d'un projet géothermique montre dans quelle mesure cet investissement se compare avec celui dans un autre système. Si la VAN est positive, l'investissement dans un système géothermique est plus avantageux; dans le cas contraire, l'autre système constitue une meilleure option. La VAN représente la valeur nette d'un projet en dollars d'aujourd'hui. Donc, c'est la somme de toutes les économies (ou pertes) futures, rectifiée pour tenir compte du taux d'intérêt (ou la somme nécessaire aujourd'hui pour obtenir les mêmes économies à l'avenir), moins le coût initial.

$$\text{Valeur actualisée nette} = \left(\sum_{\text{Année} = 1}^{\text{Vie du système}} \frac{\text{Économies annuelles nettes}}{(1 + \text{taux d'intérêt})^{\text{Année}}} \right) - \text{Coût initial}$$

Taux de rendement interne

Le taux de rendement interne (TRI) représente le taux d'intérêt réel qui équivaut aux bénéfices du projet sur toute sa vie utile, que l'on appelle également rendement du capital investi (RCI). On le calcule en trouvant le taux d'actualisation qui amène la VAN du projet à correspondre à zéro. Donc, si les économies sont élevées, un taux d'actualisation (TRI) plus élevé est requis pour rendre l'équation de la VAN égale à zéro. On peut considérer le TRI comme étant le taux d'intérêt qui aurait pu être appliqué au coût additionnel d'un système géothermique, s'il avait été investi autrement.

Exemple de calcul

Les propriétaires d'un bâtiment de Halifax (Nouvelle-Écosse) ont estimé la dimension d'un système vertical et souhaitent évaluer le coût initial, les économies et les indicateurs financiers approximatifs liés à ce genre de système. Le tarif moyen de l'énergie pour leur bâtiment de 2 500 m^2 est 0,10 $/kWh (y compris les frais liés à la demande).

Utilisation de la règle approximative des $/kWh

La dimension du système vertical utilisée dans cette évaluation préliminaire est basée sur une charge de pointe de 100 kW et 1 000 m de puits de forage. Le coût total pourrait être évalué à l'aide des tableaux précédents comme suit :

Coût initial du système géothermique

Puits de forage : 1 000 m X 20 $/m = 20 000 $
Tuyaux : 2 000 m X 2,5 $/m = 5 000 $
Vannes et raccords : 100 kW X 10 $/kW = 1 000 $
Pompes à chaleur : 100 kW X 350 $/kW = 35 000 $
Tuyauterie interne et isolant = 20 000 $
Pompes de circulation = 100 kW X 0,017 W/kW X 1 000 $/kW
= 1 700 $
Total = 82 700 $

Le coût du système conventionnel, basé sur des appareils de toit à un coût de 500 $/kW, serait de 50 000 $.

La consommation et le coût annuels d'énergie du bâtiment sont évalués d'après les factures de service public comme suit :

Système conventionnel

Refroidissement ($COP_{classique}$ de 3,0)	= 40 000 kWh X 0,10 $/kWh = 4 000 $
Chauffage (tout électrique)	= 184 000 kWh X 0,10 $/kWh = 18 400 $

Estimation pour le système géothermique

La solution qui suit indique une PRI relativement courte. Dans un tel cas, les indicateurs financiers à long terme peuvent ne pas être nécessaires lors des premières étapes du projet. Une telle période de recouvrement devrait inciter les propriétaires à procéder à une évaluation plus approfondie de la conception et du coût du système. On pourrait rectifier également le calcul du PRI pour tenir compte des autres frais, tels ceux liés à une étude de faisabilité, et pour escompter d'autres économies, comme celles relatives aux frais liés à la demande électrique. En utilisant un outil de préfaisabilité comme le logiciel RETScreen®, l'analyse pourrait automatiquement inclure ce genre de détails.

Refroidissement (COP de 3,5)	= 40 000 kWh X 3,0/3,5 = 34 285 kWh X 0,10 $/kWh = 3 429 $
Chauffage (COP de 2,5)	= 184 000 kWh/2,5 = 73 600 kWh X 0,10 $/kWh = 7 360 $
Économies	= 11 611 $/an
Récupération simple	= 2,8 ans sur le coût additionnel

Chapitre 9 : Aspects pratiques

Boucles souterraines

Vu que les boucles souterraines d'un système géothermique sont habituellement très difficiles à atteindre après l'installation, les matériaux et l'exécution du travail doivent être de la plus haute qualité. La tuyauterie utilisée est presque exclusivement du polyéthylène haute densité, et les raccords sont assemblés par fusion. Pour installer une boucle de sol ou de puits d'eau, il faut faire appel à des installateurs ayant de l'expérience en systèmes géothermiques.

Boucle horizontale

L'excavation de tranchées pour une boucle souterraine horizontale peut se faire avec une rétrocaveuse, une trancheuse à chaîne, une charrue vibratoire ou même un bulldozer s'il s'agit d'un grand champ. Le coût unitaire du creusage de tranchées et du remblayage peut être influencé par des facteurs comme la profondeur des tranchées, le type de sol, la présence d'obstacles (p. ex., des blocs de pierre) et le nombre de manœuvres. Le remblayage est essentiel pour le bon rendement et l'intégrité de la boucle souterraine. Il faut éviter que de grosses pierres fassent partie du matériel de remblayage, et l'on devrait utiliser du sable autour des tuyaux.

De nouveaux types d'équipement de creusage qui permettent le forage horizontal facilitent le recours à des boucles horizontales, en perturbant au minimum l'aménagement paysager. Des machines de forage horizontal permettent même d'installer des boucles sous des bâtiments ou des terrains de stationnement existants.

La tuyauterie devrait être composée uniquement de produits approuvés par la CSA. Elle devrait être raccordée par fusion, ce qui rend les joints plus solides que les tuyaux mêmes. Certains fabricants offrent des garanties pouvant aller jusqu'à 50 ans.

Pour assurer de bons résultats, la tuyauterie devrait être posée par des installateurs certifiés qui possèdent de l'expérience des systèmes à boucle horizontale. Une installation incorrecte peut entraîner des problèmes : par exemple, en n'enfouissant pas la boucle sous la profondeur de gel, la tuyauterie pourrait être déplacée lors des gels et des dégels.

On recommande habituellement une analyse du sol pour les systèmes à boucle horizontale, puisque les propriétés du sol ont une influence importante sur le dimensionnement et le rendement du système. Les études géotechniques relatives à ces systèmes consistent habituellement en un forage d'essai pour connaître les conditions souterraines. Dans le cas d'une boucle souterraine de moins d'un hectare de superficie, on recommande de creuser au moins quatre trous. Si la boucle occupe plus de deux hectares, il est recommandé de procéder à deux trous d'essai par hectare.

Boucle souterraine verticale

Dans le cas des boucles verticales (puisant l'énergie du sol ou de l'eau), le forage peut s'effectuer au moyen d'équipement classique comme des foreuses rotatives, à câble ou pneumatiques. Le coût unitaire du forage est étroitement lié au type de sol. Le forage sera plus dispendieux et prendra plus de temps dans la roche dure. Le diamètre du puits ou du trou de forage influe également sur le coût du forage et de l'injection de coulis. Les trous de forage verticaux peuvent être d'un diamètre plus petit (10 à 15 cm) que les puits d'eau, qui peuvent avoir entre 15 et 40 cm, suivant le débit souhaité.

Le coulis injecté dans les puits verticaux consiste en un matériau spécial, le plus courant étant la bentonite à haute teneur en solides. Il sert à empêcher la contamination des aquifères par l'eau de surface ou d'autres aquifères. Toute la chaleur transférée entre les tuyaux du trou de forage (c.-à-d. la boucle souterraine) et la source de chaleur (c.-à-d. le sol) doit passer à travers ce coulis. Malheureusement, les coulis à la bentonite typiques sont de mauvais conducteurs de chaleur. On peut recourir à des techniques spéciales servant à améliorer le taux de transfert de chaleur à travers le coulis, tout en conservant ses propriétés d'agent protecteur. La pertinence économique de ces techniques doit être évaluée au cas par cas.

Pour les boucles verticales, il vaut souvent la peine d'entreprendre une étude hydrogéologique. En outre, cette dernière permettra de documenter la qualité de l'eau souterraine avant l'installation de la boucle. Cela devrait contribuer à protéger le propriétaire contre toute responsabilité si jamais l'eau souterraine avait été contaminée avant l'installation du système.

Une étude géotechnique relative à une boucle verticale exige le forage de trous d'essai à une profondeur d'au moins 15 m sous le trou le plus profond prévu pour la boucle. L'étude permettra d'établir un rapport détaillé sur le type, la profondeur et la composition du sol sur les lieux. Autre avantage du trou d'essai, il peut servir à l'essai de la technique de forage. La pose d'un tuyau spécial conçu pour un essai de réponse thermique à long terme du trou de forage offre également des renseignements utiles quant aux caractéristiques thermiques du sol et d'un futur champ de forage. L'essai de réponse thermique permet aux concepteurs d'optimiser la boucle de sol. Dans le cas des bâtiments inférieurs à 3 000 m^2, un seul trou d'essai suffit; deux trous devraient être forés dans le cas de bâtiments plus grands.

Problématique de l'utilisation de l'eau : les puits

Dans certains systèmes géothermiques à eau souterraine, l'eau est pompée du ou des puits pour conditionner la boucle du bâtiment puis évacuée dans un puits de surface, un lac ou un ruisseau. De l'eau est donc extraite continuellement de l'aquifère. Cette pratique a soulevé des inquiétudes de nature environnementale : les aquifères peuvent s'épuiser si l'eau utilisée n'est pas réinjectée. De plus, le risque de contamination inquiète de plus en plus. Les puits mal installés peuvent devenir une voie par laquelle des pesticides, des engrais, des substances organiques et d'autres contaminants sont transportés vers les aquifères souterrains.

Certaines municipalités, provinces et territoires interdisent ou limitent l'utilisation des systèmes à eau souterraine. Si vous envisagez l'installation d'un tel système, vous devriez vous enquérir auprès des autorités pertinentes (locale, provinciale ou territoriale et fédérale).

Puits d'injection

Dans les endroits où le rejet de l'eau souterraine à la surface est interdit, il faut installer des puits d'injection. Ces derniers permettent de renvoyer l'eau souterraine dans l'aquifère d'où elle a été extraite. Cependant, certaines instances pourraient considérer le renvoi d'eau chaude ou froide dans un aquifère comme étant de la « pollution thermique »; il faut donc consulter les règlements applicables.

Les puits d'injection devraient être forés en même temps que le puits d'alimentation, et ils doivent être suffisamment profonds pour recevoir la quantité maximale d'eau provenant du système géothermique. Ils doivent se situer à au moins 30 m (100 pi) du puits d'alimentation, et déboucher directement dans le même aquifère. Habituellement, les puits d'injection ont une capacité équivalente à seulement 50 à 75 p. 100 de l'eau qui pourrait y être soutirée. Un certain nombre de contraintes s'appliquent aux puits d'injection; il est conseillé de toujours consulter un professionnel d'expérience tel un hydrogéologue ou un ingénieur sur des sujets comme ceux-ci :

- l'incrustation de minéraux;
- le débordement du puits d'injection;
- la possibilité d'utiliser un système réversible (inversion saisonnière des puits d'alimentation et d'injection).

Habituellement, les systèmes à eau souterraine exigent l'analyse de site la plus approfondie. Dans ce cas, il faut procéder à une évaluation hydrogéologique. L'étude devrait être effectuée par un hydrogéologue qualifié; elle comprend notamment les éléments suivants :

- un relevé de tous les règlements pertinents à l'installation d'un système à eau souterraine au site proposé;
- une revue des renseignements existants sur les plans géologique et hydrogéologique quant à l'emplacement désigné;
- une étude souterraine par l'entremise de forage d'essai.

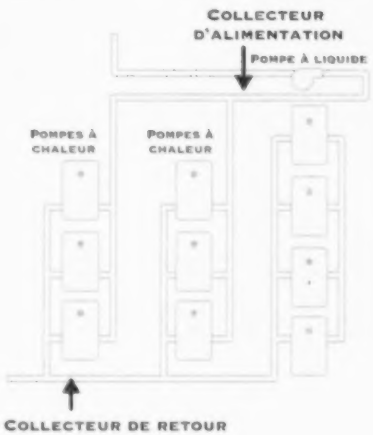
Le nombre de puits d'essai requis dépend de la dimension de la boucle souterraine proposée. Dans le cas des bâtiments inférieurs à 3 000 m^2, un seul trou suffit habituellement, mais dans le cas des bâtiments plus grands, au moins deux trous devraient être forés.

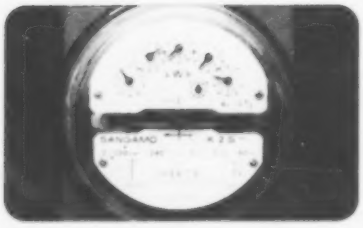
Lignes directrices en matière de pompage

Voici certaines lignes directrices générales pour les systèmes géothermiques quant à l'utilisation des pompes :

- Le débit dans les boucles de sol ne devrait pas dépasser 0,054 L/s par kW de charge nette de pointe.
- Le calcul du débit de la boucle du bâtiment et de l'eau souterraine doit être basé sur la charge nette.
- La perte de pression par la boucle du bâtiment ne devrait pas dépasser 1,5 m de colonne d'eau (CE) pour chaque 30 m de longueur équivalente de tuyau, afin de limiter la consommation d'énergie associée au pompage.
- Habituellement, les systèmes géothermiques commerciaux utilisent un système à pompes jumelées dans la boucle du bâtiment – soit une pompe principale et une pompe auxiliaire équivalente. On peut utiliser les deux pompes en alternance pour égaliser l'usure mécanique.
- La perte de pression au travers des pompes à chaleur ne devrait pas dépasser 4 m CE.
- La perte de pression pour la boucle souterraine ne devrait pas dépasser 1,5 m CE pour chaque 30,5 m de tuyau.
- Dimensionner les pompes en vue de les faire fonctionner à un rendement presque maximal. Il faut éviter le surdimensionnement.
- Garder la concentration de solution antigel au minimum; une concentration plus élevée entraîne en général une consommation d'énergie accrue.
- Passer en revue diverses options pour maximiser le rendement énergétique de pompage (pompes à vitesse variable, à plusieurs vitesses, primaires ou secondaires, etc.).

Figure 32. Système à boucle de sol





On peut évaluer la puissance d'une pompe dès que l'on connaît le débit et la perte de pression en se servant de la formule suivante :

$$\text{Puissance de la pompe} = \frac{\text{Débit} \times \text{Perte de pression}}{\text{Rendement de la pompe}}$$

Les systèmes de contrôle complexes, et les dispositifs qui leur sont associés (p. ex., vitesse variable avec transducteur de pression, électrovannes à deux voies et contôle par microprocesseur), peuvent rendre l'utilisation et l'entretien du système beaucoup plus complexes pour les préposés des systèmes de CVC. Avant de recommander l'installation de tels systèmes, il faut évaluer leur impact sur la fiabilité et l'entretien du système.

À PROPOS DES TARIFS D'ÉLECTRICITÉ

Le recours à un système géothermique ne réduit pas uniquement la consommation d'énergie du bâtiment, il a également pour effet de diminuer la demande d'électricité.

L'utilisation d'électricité se mesure de deux façons, soit la puissance maximale pour une période de temps donnée (l'appel de puissance en kilowatts) et la consommation cumulative totale (mesurée en kilowattheures).

Pour établir les frais d'appel de puissance, les entreprises utilisent souvent un compteur qui enregistre la puissance appelée en kilowatts (kW) sur une période soit de 15 ou de 30 minutes. La puissance moyenne utilisée durant cette période sert à calculer la demande de pointe en kW.

La demande de pointe qui sert aux fins de facturation pour un mois donné dépendra de l'heure, de la période de l'année ou d'autres facteurs selon le fournisseur d'électricité local.

Pour déterminer les frais d'énergie, le compteur qui lit la puissance appelée sur des périodes de 15 ou de 30 minutes enregistre également la consommation totale. Le compteur est relevé tous les mois environ, et la consommation d'énergie est facturée suivant les programmes de tarification applicables.

Les barèmes de tarification d'électricité peuvent être très complexes et facilement faire l'objet d'une interprétation erronée. Vérifiez toujours auprès du représentant du service public local pour obtenir de l'aide à cet égard.

Mise en service

Tout système de CVC doit être mis en service d'une manière appropriée pour qu'il atteigne son rendement optimal. Toutefois, cette étape est souvent traitée de façon expéditive, ce qui entraîne souvent un rendement moins qu'optimal des systèmes. Vu que les avantages économiques d'un système géothermique dépendent énormément de son rendement global, la phase de la mise en service est d'autant plus importante. Voici des lignes directrices générales en matière de mise en service que l'on devrait suivre pour tout projet géothermique :

- La mise en service doit aller au-delà de la simple mise en marche du système et faire en sorte que tout démarre bien.
- On devrait présenter au propriétaire du bâtiment un plan d'essai bien conçu pour vérifier les caractéristiques de fonctionnement et de performance du système.
- Mettre le système de contôle à l'essai selon tous les modes de fonctionnement (p. ex., le chauffage avec et sans appareils de chauffage d'appoint, le refroidissement gratuit, les évacuateurs de chaleur auxiliaires, etc.).
- Vérifier l'appel de puissance et la consommation d'énergie de toutes les pompes de circulation, les pompes de puits et les ventilateurs (en tenant compte des facteurs de puissance).
- Vérifier la puissance et le rendement de toutes les pompes à chaleur de la boucle du bâtiment.
- Effectuer une vérification de la distribution du débit d'eau et de l'équilibrage du débit d'air.
- Porter une attention particulière à la vérification du débit d'air extérieur, en particulier si l'on n'utilise pas de ventilateur de retour. Il faut effectuer ces essais avec et sans fonctionnement des ventilateurs d'évacuation locaux.
- Vérifier le fonctionnement des vannes de régulation et de dérivation.
- Vérifier la puissance de l'équipement auxiliaire (chauffage de l'eau, évacuation de la chaleur, chaleur d'appoint).
- Vérifier la concentration de la solution antigel.
- Vérifier les procédures de démarrage et d'arrêt de même que les diverses séquences de contrôle.
- Vérifier la précision des capteurs principaux (température, pression).

L'importance accordée à la phase de mise en service doit être fonction de la taille du projet. Toutefois, même les petits projets géothermiques doivent comporter un plan d'essai de base pour la mise en service. Il est conseillé que les propriétaires ou l'un de leurs représentants soient présents durant les essais.

Gabarit d'un devis de performance pour système géothermique

Lorsqu'on envisage d'aller de l'avant avec un projet géothermique, il faut se pencher sur un certain nombre d'éléments clés. Une façon d'y parvenir sans avoir à entreprendre une conception détaillée consiste à établir un devis de performance, que le concepteur ou l'entrepreneur responsable du projet devra respecter. Le devis indique les diverses lignes directrices qui doivent être appliquées durant la conception, l'installation et la mise en service, sans y préciser tous les détails. Il revient aux soumissionnaires du projet de démontrer la façon dont ils respecteront le devis. Vous trouverez ci-après un exemple de devis de performance. Celui-ci ne couvre pas tous les aspects possibles des projets géothermiques, mais relève des questions importantes.

Pompes à chaleur et systèmes du bâtiment

- L'installation du système géothermique doit respecter la norme CAN/CSA-C448.1-02 de la CSA.
- Toutes les pompes à chaleur doivent être testées suivant des normes reconnues, comme la norme précitée ou un équivalent, et afficher au minimum un EER (refroidissement) de 13 de même qu'un COP de chauffage de 3,5, ou dépasser les exigences réglementaires locales.
- Toutes les pompes à chaleur doivent minimiser la perte de pression à travers leur échangeur de chaleur liquide-frigorigène, et produire une perte de pression ne dépassant pas 36 kPa au débit nominal.
- Toutes les pompes à chaleur doivent avoir une puissance suffisante pour répondre à la demande de chauffage de pointe dans toutes les zones sans recourir à un système de chauffage d'appoint.
- Toutes les pompes à chaleur doivent avoir une puissance de refroidissement suffisante pour assurer un bon fonctionnement et la déshumidification nécessaire. Si les puissances de refroidissement dépassent 125 p. 100 des demandes de refroidissement de calcul, il faut démontrer que le surdimensionnement ne mènera pas à la détérioration du rendement de l'équipement.
- Les débits d'air extérieur alimentés, directement ou indirectement, aux pompes à chaleur doivent respecter les règlements locaux. En l'absence de tels règlements, le débit d'air extérieur minimal doit être basé sur le *Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments*, ou sur la version la plus récente de la norme 62 de l'ASHRAE.
- Il faut prendre les mesures appropriées pour voir à ce que la température de l'air d'entrée aux pompes à chaleur, après le mélange avec l'air extérieur, soit toujours d'au moins 10 °C.
- L'utilisation directe de l'énergie électrique pour conditionner l'air extérieur devrait être éviter, si possible.

- Le système de distribution du bâtiment doit permettre que l'entretien des pompes à chaleur individuelles se fasse sans compromettre le fonctionnement de tout le système géothermique.
- Les pompes à chaleur doivent inclure les accessoires requis pour éliminer le condensat durant le refroidissement.
- Il faut démontrer que la puissance de pompage de la boucle du bâtiment sera inférieure à 56 W par tonne de charge nette de pointe.

Charges

- Il faut évaluer les charges de chauffage et de refroidissement suivant des méthodes reconnues, comme celles recommandées dans la norme CAN/CSA-C13256-01 de la CSA.
- Il faut évaluer les charges de chauffage et de refroidissement de pointe pour chaque zone desservie par le système géothermique, et cette évaluation doit être suffisamment documentée.
- Il faut évaluer les charges nettes de chauffage et de refroidissement de chaque groupe de zones desservi par une boucle souterraine commune.

Boucle souterraine

- La conception de la boucle souterraine est basée sur la charge nette des locaux du bâtiment qui seront desservis.
- L'installation de la boucle souterraine doit respecter la norme CAN/CSA-C448.1-02 de la CSA.
- Il faut démontrer que l'on a correctement évalué les possibilités de systèmes hybrides en fonction de leur coût et de leur rendement.
- La procédure de dimensionnement de la boucle souterraine doit être conforme aux méthodes reconnues et elle doit être suffisamment documentée. L'approbation de professionnels reconnus, comme des ingénieurs, est toujours recommandée, et elle est obligatoire à beaucoup d'endroits.
- Il faut recueillir toutes les données d'études géotechniques nécessaires avant de procéder au dimensionnement final de la boucle souterraine.

Renseignements importants à obtenir des fournisseurs et entrepreneurs

Demandez à vos fournisseurs et entrepreneurs en systèmes géothermiques les renseignements suivants :

Généralités

- Des références et une liste de clients satisfaits;
- des preuves de leur capacité financière ou le versement d'une caution;
- des preuves de la certification du fabricant;
- les certificats de frigoriste des employés de l'entrepreneur;
- les certificats de soudage par fusion des tuyaux des employés de l'entrepreneur;
- les certificats en forage de puits ou en géothermie des sous-traitants;
- les dispositions de garantie du fabricant ainsi que des garanties prolongées;
- les dispositions de financement du coût des immobilisations.

Particularités

- Une analyse détaillée des charges de chauffage et de refroidissement;
- la conception et les spécifications du système;
- le rendement et les économies de coûts prévus;
- la conception technique et la spécification des travaux extérieurs;
- les approbations réglementaires des travaux intérieurs et extérieurs;
- les dispositions en matière de sécurité;
- un système à eau chaude intégré en plus de la climatisation;
- la spécification des commandes du système;
- la finition intérieure et l'aménagement paysager au parachèvement des travaux;
- un manuel et un calendrier d'entretien et de service;
- un calendrier d'entretien préventif;
- la garantie de bonne exécution de l'entrepreneur.

ANNEXES

Annexe A : Études de cas

Nouvelle construction

Établissement pour détenues sous responsabilité fédérale

Points saillants :

- économies annuelles de 8 340 $ en coûts énergétiques
- période de récupération simple de 9 ans

L'établissement pour détenues sous responsabilité fédérale est un complexe de 3 840 m^2 situé à Truro (Nouvelle-Écosse). Les installations sont constituées de 12 bâtiments de un et de deux étages comprenant des unités résidentielles, un gymnase, un bâtiment récréatif, un bâtiment éducatif, des locaux de bureau, des services d'alimentation et de santé et un bâtiment à sécurité renforcée. Cet établissement peut accueillir 35 détenues et membres du personnel.

Il a été construit en 1994 dans le cadre des initiatives relatives au Plan vert du Service correctionnel du Canada (SCC). Pour lui permettre d'atteindre les objectifs de réduction d'émissions de dioxyde de carbone (CO_2) du Plan vert, un système géothermique à boucle de sol a été installé.

Le Service correctionnel a choisi un système de distribution par rayonnement à partir des planchers pour des raisons de sécurité. Des pompes font circuler l'eau chauffée par des pompes à chaleur eau-eau dans des tuyaux installés sous les planchers. Le SCC désirait aussi avoir un système de chauffage d'appoint au propane en cas de problèmes avec le système géothermique. Le chauffage d'appoint est assuré par des chauffe-eau solaires reliés à des échangeurs de chaleur eau-eau.

La consommation d'énergie des systèmes géothermique et de CVC classique a été déterminée par une analyse énergétique ou environnementale effectuée avant l'installation du système géothermique. Ce dernier permet une économie énergétique annuelle de 8 340 $. La période de récupération simple du projet est d'environ neuf ans.

Source : Adaptation de *Operating Experiences with Commercial Ground-Source Systems*, avec la permission de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE); www.ashrae.org.

École secondaire Father Michael McGivney

L'école secondaire Father Michael McGivney est un bâtiment de trois étages de 16 800 m² situé à Markham (Ontario), au nord de Toronto. Construite en 1992, cette école compte 38 salles de classe, 19 laboratoires et ateliers, une bibliothèque, des bureaux administratifs, une chapelle, une serre, une cafétéria, trois gymnases et une garderie. Cette école peut accueillir près de 2 400 étudiants et membres du personnel.

La décision d'installer un système géothermique reposait sur deux motifs économiques :

- le fournisseur d'électricité y avait un programme incitatif très attrayant favorisant les systèmes géothermiques;
- la géothermie permettait de réduire les dimensions de la salle technique, libérant ainsi de l'espace pour les salles de classe, facteur sur lequel s'appuient les subventions gouvernementales.

Le système répond aux attentes du propriétaire. Des systèmes semblables ont été installés dans sept nouvelles écoles au cours des dernières années, ce qui témoigne de la satisfaction de la commission scolaire.

D'après l'analyse des factures de service public, le système géothermique permet une économie annuelle de 9 420 $ des coûts d'énergie, comparativement à un système central avec refroidisseur et chaudière à gaz.

Points saillants :

- économies annuelles de 9 420 $ en coûts énergétiques
- plus petite salle technique requise

Source : Adaptation de *Operating Experiences with Commercial Ground-Source Systems*, avec la permission de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE); www.ashrae.org.

Chauffe-eau économique pour pisciculture

Alléghanys Inc., une entreprise agricole du Québec, a mis à l'essai un nouveau système de chauffage pour augmenter sa production. La chaleur est récupérée en deux étapes : une récupération passive de la chaleur de l'effluent par le biais d'un échangeur de chaleur, et une récupération de la chaleur active par l'entremise d'une pompe à chaleur, entre l'eau d'admission préchauffée et la sortie de l'eau usée. Grâce au COP de 10,7 du système, la consommation d'énergie a été réduite de 87 p. 100, et il en a résulté une augmentation de 40 p. 100 de la production. L'investissement initial plus élevé de 85 000 $ (par rapport aux systèmes classiques) a été récupéré en moins d'un an et demi grâce à des économies d'énergie élevées.

La pompe à chaleur utilise le HCFC-22. La boucle interne de frigorigène est dotée de trois compresseurs en parallèle. Cette caractéristique assure une température constante de 12 °C, qui contribue à éviter des problèmes comme l'encrassement des échangeurs.

Points saillants :

- consommation d'énergie réduite de 87 p. 100
- économies de 23 657 $ et de 14 035 $ par rapport aux systèmes à l'électricité et au mazout, respectivement
- période de récupération inférieure à 1,5 an

Dans l'ensemble, le système a réduit la consommation d'énergie à 184,6 MWh, comparativement à un système classique (électrique ou au mazout) qui utiliserait environ 1 468 MWh. Il s'agit d'une économie d'environ 87 p. 100. De plus, une analyse préliminaire effectuée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec a constaté une augmentation de la production de 40 p. 100, grâce aux écarts de température des étangs d'élevage.

Des avantages environnementaux en sont également ressortis. L'utilisation d'une pompe à chaleur au lieu d'un système classique au mazout évite l'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit d'une réduction des émissions de CO_2 d'environ 218 tonnes par an (t/an), comparativement à un système à l'électricité, et de 357 t/an pour l'équivalent au mazout.

Source : Adapté avec la permission du Centre international d'intervention pour l'analyse et la diffusion des techniques énergétiques démontrées (CADDET).

Eau d'exhaure géothermique comme source d'énergie des pompes à chaleur

Ropak Can Am Ltd., fabricant de produits d'emballage en plastique, utilise l'énergie géothermique provenant des eaux de crue de mines abandonnées pour chauffer et refroidir ses installations à Springhill (Nouvelle-Écosse). Il s'agit du premier site industriel du Canada à démontrer la viabilité économique et technique de cette source d'énergie. L'eau d'une mine inondée, d'une température de 18 °C, est pompée à un débit de 4 L/s, et elle passe par une pompe à chaleur avant d'être injectée dans une autre mine (qui y est reliée).

Points saillants :

- coût des immobilisations plus faible que celui d'un système classique
- économies énergétiques annuelles de 45 000 $
- source d'énergie non polluante

Les économies d'énergie annuelles brutes (mazout et électricité) de la nouvelle usine sont d'environ 65 000 $ (comparativement aux coûts d'un système classique). Après déduction des coûts de fonctionnement et d'entretien (notamment le coût de l'électricité des nouvelles pompes à chaleur), les économies nettes de la nouvelle usine dépassent 45 000 $ par an, ce qui équivaut à une économie d'environ 600 000 kWh.

Le projet a permis d'obtenir beaucoup d'autres avantages. Du fait que la nouvelle climatisation offre de meilleures conditions de travail, les employés de l'usine s'absentent moins souvent. La réduction du temps d'entretien et du temps de panne, l'amélioration de l'efficacité de la production (en hausse de 9 p. 100 en 1989) et un meilleur moral des employés sont tous dus à l'installation géothermique.

Source : Adapté avec la permission du Centre international d'intervention pour l'analyse et la diffusion des techniques énergétiques démontrées (CADDET).

Un aréna efficace et moins coûteux dans une petite ville du sud-ouest du Manitoba

Durant les longs hivers manitobains, la patinoire est vraiment le centre de toutes les activités de la petite ville de Miami, dans le sud-ouest de la province. Depuis la construction de la patinoire en 1952, la collectivité avait toujours compté sur les vents froids des Prairies pour produire la glace nécessaire au hockey et au patinage artistique. On pouvait espérer durant un hiver typique profiter de 50 à 100 jours de hockey et de patinage, souvent interrompus par les périodes de réchauffement de la mi-janvier. Mais au fur et à mesure que les villes voisines se dotaient de patinoires à glace artificielle, on s'est mis à ignorer Miami pour les tournois de hockey et les épreuves de patinage.

Les autorités ont donc décidé en 1998 de prendre les mesures nécessaires pour avoir de la glace pendant une période plus longue et sans interruption et, en même temps, réduire les frais d'exploitation et les opérations d'entretien au minimum. Grâce à un concept unique en son genre et à un système géothermique, la patinoire de Miami utilise le stockage thermique pour produire la glace et assurer le chauffage et la climatisation des locaux et d'une salle communautaire attenante.

La saison de patinage peut commencer jusqu'à six semaines plus tôt à l'automne et se terminer un mois plus tard au printemps, ce qui s'est traduit par une augmentation des recettes et par un plus grand confort dans les deux bâtiments. Il devrait être possible de récupérer en moins de trois ans la différence de coût entre le système géothermique et un système de réfrigération classique d'un aréna. Quand on calcule les économies des coûts d'entretien, la période de récupération du système se ramène à moins de deux ans.

Source : Adaptation de *Production de glace simplifiée et moins coûteuse dans une petite ville du sud-ouest du Manitoba*, Ressources naturelles Canada, Étude de cas, volume 1, n° 4, avril 2000.

Points saillants :

- l'approche progressive a réparti le coût des immobilisations
- des économies annuelles de 30 000 $ au chapitre du fonctionnement, de l'entretien et de l'énergie ont réduit la période de récupération à moins de 2 ans
- ce système évite la nécessité de modifier l'entrée électrique qu'entrainerait un système de production de glace classique
- un système de CVC performant est intégré au système géothermique
- entretien simple et formation peu coûteuse des préposés
- les coûts de la mise en service d'automne et de la mise hors service du printemps (système classique de production de glace à l'ammoniac ou au fréon) sont éliminés
- un seul système pour la production de la glace et le chauffage des locaux

Réfection d'un vieux bâtiment industriel à l'aide d'un système de pompes à chaleur géothermiques

Un bâtiment de cinq étages à Montréal, construit en 1923, a été transformé en un immeuble de bureaux à la fine pointe. Pour répondre aux nouveaux besoins de confort, il a fallu installer un système de CVC décentralisé. Le choix s'est porté sur un système géothermique, qui procure des économies annuelles se situant entre 30 000 $ et 35 000 $ à partir d'un investissement initial de 375 000 $.

Points saillants :

- économies de 175 000 $ (650 MWh) par rapport à un système classique
- réduction de 66 p. 100 de la consommation d'énergie pour le chauffage
- installation exclusivement dans les locaux occupés

En plus du système de CVC, on a notamment installé un système de commande central du bâtiment. D'autres options ont pu être laissées de côté en raison du choix de l'option pompe à chaleur (entre autres, une tour de refroidissement et des ventiloconvecteurs), ce qui a permis de construire une terrasse aux troisième et quatrième étages, ce qui a ajouté à l'esthétique d'ensemble du bâtiment. Ce système a apporté des gains immédiats : la souplesse de fonctionnement et de réglage de la température, le niveau de bruit réduit et la possibilité de s'installer uniquement dans les locaux occupés (ce qui laissait davantage de locaux à louer).

La consommation d'énergie a été ramenée de 1 000 MWh à 350 MWh par an. En d'autres termes, ce système consomme 66 p. 100 d'énergie en moins pour le chauffage qu'un système classique. Cela se traduit par une économie de 6,5 t de CO_2 par an. De plus, la simplicité de la conception facilite l'entretien (et par conséquent, coûte moins cher) et économise beaucoup d'espace. En effet, la salle technique a été réduite au minimum – deux échangeurs de chaleur à plaque et cinq pompes de circulation – et il n'y a aucun appareil à l'extérieur.

Source : Adapté avec la permission du Centre international d'intervention pour l'analyse et la diffusion des techniques énergétiques démontrées (CADDET).

Annexe B : Ressources

Les organismes suivants offrent un complément d'information sur les systèmes géothermiques.

Au Canada :

Division de l'énergie renouvelable et électrique
Direction des ressources énergétiques
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 17e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Téléc. : (613) 995-0087
Site Web : http://www.rncan.gc.ca/es/erb/reed

Centre de la technologie de l'énergie de CANMET – Varennes (CTEC)
Ressources naturelles Canada
1615, boulevard Lionel-Boulet
C.P. 4800
Varennes (Québec) J3X 1S6
Site Web : http://www.lrdec.com

Centre de la technologie de l'énergie de CANMET
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 13e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Téléc. : (613) 996-9418
Site Web : http://www.rncan.gc.ca/se/etb/index_fr.htm

Réseau canadien des énergies renouvelables (ResCER)
Ressources naturelles Canada
Site Web : http://www.rescer.gc.ca

Pour en savoir davantage sur les fabricants, les détaillants, les distributeurs, les entrepreneurs ou les installateurs de systèmes géothermiques dans votre région, veuillez communiquer avec :

Société canadienne de l'énergie du sol
124, rue O'Connor, pièce 504
Ottawa (Ontario) K1P 5M9
Tél. : (613) 371-3372
Téléc. : (613) 822-4987
Site Web : http://www.earthenergy.ca

Aux États-Unis :

Geothermal Heat Pump Consortium, Inc.
701 Pennsylvania Avenue, NW
Washington DC 20004-2696
U.S.A.
Tél. : 1 888 255-4436 (sans frais)
Site Web : http://www.geoexchange.org

GEO-HEAT CENTER
Oregon Institute of Technology
3201 Campus Drive
Klamath Falls OR 97601
U.S.A.

International Ground Source Heat Pump Association
490 Cordell
South Oklahoma State University
Stillwater OK 74078-8018 U.S.A.

Nous vous offrons gratuitement un logiciel pour vous aider!

Les technologies relatives aux énergies renouvelables, par exemple l'énergie du sol, peuvent s'avérer un investissement judicieux. Cette possibilité peut se rapprocher de la réalité à l'aide de RETScreen®. Ce logiciel normalisé d'analyse de projets d'énergie renouvelable vous aidera à déterminer si un système géothermique est un bon investissement dans votre cas. S'appuyant sur des tableurs Microsoft® Excel, il s'accompagne d'un guide d'utilisation complet et de bases de données de soutien pour faciliter votre évaluation. Le logiciel RETScreen® et le guide d'utilisation peuvent être téléchargés sans frais à partir du site Web http://retscreen.gc.ca. Vous pouvez également en obtenir un exemplaire de Ressources naturelles Canada par téléphone au (450) 652-4621 ou par télécopieur au (450) 652-5177.

Autres logiciels

Il existe un certain nombre de progiciels sur le marché pour aider les concepteurs et les ingénieurs à accomplir leurs tâches. Le Geothermal Heat Pump Consortium a produit une liste complète de logiciels liés aux systèmes géothermiques. À cet égard, la Société canadienne de l'énergie du sol peut également offrir des conseils. Voir la page précédente pour obtenir les coordonnées des personnes-ressources.

Autres études de cas

Vous pouvez consulter d'autres études de cas dans les sites Web suivants :

- http://www.rescer.gc.ca
- http://www.ghpc.org

Pour commander des exemplaires d'études de cas sur l'énergie géothermique dont il a été question aux pages 72 à 76, ou d'autres études de cas qui illustrent des technologies géothermiques ou d'autres énergies renouvelables, veuillez communiquer avec le service des publications de Ressources naturelles Canada au 1 800 387-2000. Dans la région de la capitale nationale, composez le 995-2943. Vous pouvez également envoyer une télécopie au (819) 779-2833, ou écrire à l'adresse suivante :

Publications Éconergie
a/s de DLS
1770, chemin Pink
Aylmer (Québec) K1A 1L3

Annexe C : Glossaire

Accumulateur de pression : Composant d'une pompe de puits utilisé pour prévenir un fonctionnement en courts cycles.

Air-Conditioning and Refrigeration Institute (ARI) : Association professionnelle nationale des États-Unis qui représente les fabricants de plus de 90 p. 100 des appareils de climatisation centrale et de réfrigération commerciaux produits dans ce pays (www.ari.org).

Analyse de la valeur actualisée nette : étude de ce qu'il en cofte pour posséder un systPme géothermique, en tenant compte du coft d'achat du systPme (y compris l'intérLt payé sur le montant emprunté pour se le procurer) et du coft de l'énergie nécessaire B son fonctionnement.

Antigel : Agent modificateur ajouté à l'eau dans un système à boucle fermée pour abaisser le point de congélation de l'eau.

Aquifère : Formation rocheuse ou granulaire (sable ou gravier) qui accumule l'eau et de laquelle l'eau peut être puisée; de nombreuses formations de roche fracturée ou poreuse peuvent retenir et fournir de grandes quantités d'eau et constituer ainsi une source utilisable d'énergie du sol (voir également Eau souterraine).

ASHRAE : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., association professionnelle des ingénieurs et mécaniciens du chauffage, de la réfrigération et du conditionnement de l'air des États-Unis.

Association canadienne de normalisation (CSA) : Division de CSA International, organisme canadien qui établit des normes en matière de sécurité, de rendement énergétique, de procédures, etc., notamment celles qui concernent l'installation des systèmes géothermiques.

Boucle souterraine, échangeur souterrain : Échangeur de chaleur utilisé pour déplacer la chaleur entre une pompe à chaleur et le sol en utilisant un liquide comme agent de transfert. Les différentes catégories de boucles souterraines de systèmes géothermiques comprennent les suivantes :

Boucle de lac (ou d'océan ou d'étang) : tuyaux scellés disposés pour former des boucles et submergés dans un lac (ou un océan ou un étang) dans lesquels circule un frigorigène qui absorbe la chaleur de l'eau ou qui libère la chaleur excédentaire du bâtiment dans l'eau.

Boucle de sol : tuyau souterrain scellé dans lequel circule un fluide caloporteur pour transférer la chaleur en provenance ou à destination du sol.

Boucle fermée : système souterrain scellé enfoui dans le sol ou submergé dans l'eau, dans lequel circule un fluide caloporteur (frigorigène).

Boucle horizontale : tuyaux enterrés parallèlement au sol.

Boucle ouverte : ensemble de tuyaux pour puiser l'eau souterraine ou de surface et retourner cette eau, raccordé à une pompe à chaleur à eau; exige habituellement deux puits – l'un pour en tirer l'eau nécessaire (puits primaire ou d'alimentation) et un second où remettre l'eau recirculée (puits d'injection ou de retour).

Boucle verticale : tuyaux enterrés à un angle de 90 degrés par rapport à la surface du sol.

Branchement souterrain : Tuyaux, remplis d'un fluide portant la chaleur, qui relient la pompe à chaleur et l'échangeur souterrain (la boucle souterraine) dans un système géothermique. Le plus souvent, les tuyaux contiennent exclusivement de l'eau ou une solution d'antigel.

Btu/h : Btu par heure. Le Btu est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1 °F (0,56 °C) la température de 1 lb (une livre, soit 0,45 kg) d'eau.

CFC (chlorofluorocarbone) : Fluide utilisé comme frigorigène dans un système géothermique; c'est un composé toxique s'il est dégagé dans l'air. Des frigorigènes non toxiques sont maintenant produits (voir également Frigorigène).

Chaleur à basse température : Chaleur dont la température n'est pas assez élevée pour chauffer directement un endroit habitable.

Changement climatique : Changement de la température moyenne d'une région donnée, ou des caractéristiques du climat comme la configuration des vents et les précipitations. Le changement climatique mondial renvoie aux changements de climat sur l'ensemble de la Terre.

Charge du bâtiment (chauffage ou refroidissement) : Puissance de chauffage ou de refroidissement requise pour maintenir les locaux d'un bâtiment à la température voulue. Cette puissance se calcule à partir du transfert de chaleur pour chaque pièce, le transfert de chaleur simultané pour tout le bâtiment, et l'écart entre la température à l'intérieur et à l'extérieur.

Chauffage d'appoint, appareil de chauffage auxiliaire : Source de chauffage secondaire utilisée comme complément à la principale source de chaleur. Dans un système résidentiel, les éléments chauffants électriques sont le plus souvent utilisés pour appuyer un système d'énergie du sol. La plupart des fabricants de pompe à chaleurs peuvent installer des appareils de chauffage auxiliaire à l'intérieur de la console d'une pompe à chaleur.

Coefficient de performance de chauffage (COP_{ch}) : Mesure du rendement d'un appareil de chauffage, calculé en divisant la chaleur dégagée par la consommation d'énergie.

Coefficient de performance de refroidissement (COP_{refr}) : Mesure du rendement d'un appareil de conditionnement de l'air, calculé en divisant le refroidissement dégagé par la consommation d'énergie.

Combustibles fossiles : Substances combustibles provenant de la décomposition sur de très longues périodes de matières organiques sous forte pression; par exemple, le gaz naturel, le pétrole, le propane ou le charbon.

Compresseur : Appareil qui comprime un gaz frigorigène dans une pompe à chaleur. Cette activité élève la température du frigorigène et facilite son utilisation pour chauffer soit le bâtiment, soit l'eau sanitaire.

Coulis : Produit injecté par pompage, par un tuyau ou un boyau, au fond des trous de forage où on a installé la boucle verticale d'un système géothermique (voir également Tuyau à trémie).

Courts cycles (d'une pompe de puits) : Démarrage et arrêt fréquents d'une pompe de puits trop puissante pour un système géothermique donné. Le fonctionnement continu par courts cycles peut endommager à long terme le moteur d'une pompe à chaleur en causant l'usure prématurée de certains composants; la pompe consomme également beaucoup plus d'énergie qu'une pompe de puissance appropriée.

Coût global sur le cycle de vie (analyse du) : Semblable à l'analyse du flux d'encaisse, cette analyse est appliquée pour calculer les économies découlant d'un système géothermique. L'analyse du coût sur le cycle de vie tient compte notamment du coût d'entretien ou de remplacement, ou les deux, et de l'équipement qui se détériore avec le temps; c'est sans doute la méthode la plus précise pour déterminer le véritable coût d'un système géothermique.

CSA : voir Association canadienne de normalisation.

Cupronickel : Alliage ou combinaison de cuivre et de nickel.

Dalle sur sol : Expression habituelle qui désigne un plancher de béton coulé au niveau du sol.

Désurchauffeur : Échangeur de chaleur installé dans une pompe à chaleur directement après le compresseur et conçu pour transférer une partie de la chaleur du frigorigène chaud gazeux. Dans un système géothermique, il sert habituellement à chauffer de l'eau sanitaire.

Diamètre nominal du tuyau : Description d'un tuyau selon le système impérial d'unités.

Dimension, dimensionnement : Détermination de la puissance nécessaire d'un système de chauffage et de refroidissement fondée sur une analyse précise des pertes et des gains de chaleur des locaux (voir également Surdimensionnement).

Dispositif de purge du condensat : Robinet d'évacuation rattaché à un bac de condensation où sont recueillies les gouttelettes d'eau (le condensat) qui se forment sur le serpentin à air d'une pompe à chaleur en mode refroidissement.

Eau souterraine : Eau d'un aquifère souterrain qui est puisée pour fournir la chaleur et le refroidissement dans un système à boucle ouverte (voir également Aquifère).

Échangeur de chaleur : Appareil qui transfère la chaleur entre deux matériaux différents (entre un liquide chaud et un liquide froid, entre un liquide et l'air, entre un liquide et le sol ou entre l'air chaud et l'air froid) tout en maintenant une séparation physique entre les deux.

Échangeur souterrain : Voir Échangeur de chaleur.

EER : voir Taux de rendement énergétique en mode refroidissement.

Émissions : Particules ou gaz toxiques qui émanent de la combustion de sources d'énergie fossiles comme le pétrole, le gaz naturel, le propane et le charbon. Un système géothermique ne produit pas cette sorte d'émanations (voir également Changement climatique; Produits de combustion; Gaz à effet de serre).

Essai de pompage : Dans un système à boucle ouverte, la vérification que le puits d'alimentation et le puits d'injection supportent le débit d'eau nécessaire au fonctionnement efficace d'un système géothermique.

Fil de traçage, ruban de traçage : Fil métallique ou ruban à endos d'aluminium placé dans une tranchée au-dessus des tuyaux enfouis d'une boucle souterraine afin de les trouver plus facilement plus tard et d'éviter les dommages lors de travaux d'excavation futurs.

Frigorigène : Fluide utilisé dans une pompe à chaleur qui se condense et se vaporise à des températures et à des pressions précises afin de permettre le transfert de l'énergie thermique entre deux échangeurs de chaleur (voir également CFC).

Gaz à effet de serre : Certains des gaz qui s'échappent lors de la combustion de produits fossiles, comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO_2), l'anhydride sulfureux (SO_2) et l'oxyde nitreux (N_2O). On les nomme ainsi parce qu'ils permettent au rayonnement solaire de pénétrer dans l'atmosphère terrestre mais retiennent la chaleur dégagée par la Terre (voir également Changement climatique; Produits de combustion; Émissions).

Groupe compresseur-condenseur : Composant d'un conditionneur d'air classique qui n'est pas nécessaire dans un système à base d'énergie du sol.

Gypcrete : Nom commercial d'un mélange de béton utilisé pour couvrir les tuyaux d'un système de chauffage par rayonnement à partir du plancher. Son principal objectif est de diffuser dans l'air de la pièce la chaleur tirée de l'eau chaude qui circule dans les tuyaux.

Humidificateur (avec dérivation, sans dérivation) : Un humidificateur avec dérivation fait circuler de l'air chauffé tiré de l'air d'admission d'un système de chauffage et le retourne à l'air de retour d'un système de chauffage à air pulsé en le faisant passer dans une substance humide. Un humidificateur sans dérivation projette directement un nuage d'eau ou de vapeur dans un courant d'air chauffé qui distribue l'air dans la maison.

Infrastructure : Installations d'ingénierie de grande envergure et permanentes comme les routes, les égouts et les pipelines.

Injection de coulis par trémie : Technique utilisée durant l'installation d'une boucle verticale. Un tuyau conduisant au fond du trou de forage est posé afin d'y pomper du coulis; ce tuyau est remonté au fur et à mesure que le trou se remplit (une exigence de la CSA), en vue d'éliminer les poches d'air et d'assurer une bonne prise avec le sol (voir également Coulis).

Isolant acoustique : Matériau absorbant fixé à l'intérieur du caisson de retour d'air et des conduits pour réduire le bruit du matériel de chauffage ou de refroidissement à air pulsé.

Marges de reculement d'une propriété : Parties de terrain, habituellement le long des limites d'une propriété, réservées en vertu de règlements municipaux ou provinciaux aux fins de services communs, comme les trottoirs.

Moteur de ventilateur de soufflage : Moteur électrique utilisé pour faire fonctionner le ventilateur qui fait circuler l'air dans les conduits du système de chauffage et de refroidissement.

Période de récupération simple : Mesure sommaire pour déterminer les économies d'un système géothermique par opposition à un autre système au coût initial plus bas. La période de récupération simple d'un système géothermique se calcule en divisant la différence de coût des deux systèmes par les économies d'énergie prévues si on installe le système plus dispendieux. On ne tient pas compte des coûts d'entretien et de remplacement à long terme. Une méthode plus précise est l'analyse du flux d'encaisse qui inclut le coût d'achat du système et les coûts de l'énergie, ou l'analyse du coût global sur le cycle de vie, qui tient aussi compte du coût de remplacement de l'équipement à plus long terme.

Plenum d'alimentation d'air : Espace clos dans lequel la pression d'air est supérieure à celle de l'air extérieur. Il reçoit de l'air directement d'un appareil de chauffage ou de refroidissement à air pulsé. Les principaux conduits de distribution sont raccordés au caisson afin de répartir l'air dans la maison.

Point chaud : Endroit dans un bâtiment où la température élevée produite par un appareil de chauffage classique rend l'air beaucoup plus chaud que l'air environnant, habituellement près d'une bouche à air chaud.

Points de consigne (sur un thermostat) : Un thermostat programmable permet des réglages de température intérieure différents durant différentes périodes de la journée. Ce type de thermostat sert à diminuer à un point de consigne nocturne la température des locaux durant la nuit pour économiser l'énergie. (Le point de consigne est la température intérieure à laquelle est réglé le système.) Ce type de thermostat peut également être réglé à une température plus élevée lorsqu'il fait chaud afin d'économiser l'énergie servant à la climatisation.

Polyéthylène haute densité : Substance synthétique de longue durée dont sont composés les tuyaux d'un échangeur de chaleur souterrain.

Pompe à chaleur : Appareil au cœur d'un système géothermique qui extrait de la chaleur à basse température (provenant du sol, par exemple) d'un fluide circulant dans une boucle ouverte ou fermée et la concentre pour chauffer des locaux. Il inclut un compresseur, un moteur de ventilateur et une pompe de circulation. Une vanne réversible permet de changer le mode de fonctionnement afin de fournir soit de l'air refroidi, soit de l'air chaud à un bâtiment. Il peut se présenter sous forme de console ou transférer la chaleur de l'eau à une autre eau.

Pompe à chaleur de type console : Pompe à chaleur conçue pour chauffer ou refroidir l'air en l'absence de conduits ou d'un système de distribution d'air, utilisée en général pour le chauffage et le refroidissement d'une pièce individuelle (voir également Pompe à chaleur).

Pompe à chaleur eau-eau : Pompe à chaleur qui produit de l'eau chaude ou froide. Cette eau chaude ou froide sert à transporter l'énergie; elle est utilisée comme fluide caloporteur. L'eau chaude est souvent utilisée dans les systèmes de chauffage par rayonnement à partir du plancher et l'eau froide, avec un ventiloconvecteur. La pompe à chaleur eau-eau peut également servir au chauffage de l'eau sanitaire.

Pompe de circulation (ou pompe circulatrice) : Pompe utilisée dans un système géothermique pour faire circuler un liquide dans la boucle et dans la pompe à chaleur. Le liquide déplace la chaleur entre le sol et la pompe à chaleur.

Produits de combustion : Particules toxiques qui émanent du brûlage de combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel, le propane et le charbon. Les systèmes géothermiques ne produisent pas cette sorte d'émanation (voir également Changement climatique; Émissions; Gaz à effet de serre).

Puits de chaleur : Endroit où le système évacue la chaleur tirée d'une source de chaleur. Dans un système géothermique, le sol est la source de chaleur en mode chauffage et un puits de chaleur en mode refroidissement.

Puits d'injection (ou de retour) : Dans un système à boucle ouverte, puits par lequel on remet l'eau dans un aquifère.

Raccord souple : Raccord de conduit ou de tuyau flexible qui prévient le transfert de la vibration de l'équipement de chauffage ou de conditionnement de l'air (tel que la pompe à chaleur) au conduit ou au tuyau principal du bâtiment.

Régulation en fonction de la température extérieure : Réglage automatique utilisé d'abord avec des systèmes de chauffage par rayonnement à partir du plancher, qui élève ou diminue la température de l'eau qui circule dans un système selon la température extérieure. Lorsque la température est plus froide, une eau plus chaude circule à travers le plancher pour transporter plus de chaleur dans la pièce. À mesure que la température extérieure augmente, il faut moins de chaleur et la température de l'eau circulant dans le plancher est diminuée. Cette stratégie assure le fonctionnement constant du système de chauffage et augmente à la fois le degré de confort dans la pièce et l'efficacité du système de chauffage.

Rétrocaveuse, pelle rétrocaveuse : Appareil excavateur mécanisé, lourd et automoteur utilisé pour creuser la terre durant l'installation d'une boucle souterraine à énergie du sol.

Serpentin (à air, à eau) : L'échangeur de chaleur qui transfère l'énergie entre l'air et un frigorigène est parfois appelé serpentin à air, tandis que celui qui transfère la chaleur entre le frigorigène et le liquide qui circule dans la boucle est souvent appelé serpentin à eau.

Servitude : Droit légal accordé, en raison de l'intérêt public, à des entreprises de service public, comme les sociétés d'électricité ou de pipelines, afin d'accéder à un terrain privé ou de le traverser.

Société canadienne de l'énergie du sol : Organisme formé d'entrepreneurs, de fabricants et de concepteurs de systèmes géothermiques en vue de promouvoir au Canada la qualité de la conception et de l'installation de ces systèmes.

Solive : Une des poutres parallèles de bois ou de métal installées entre deux murs dans un bâtiment pour soutenir le plancher ou le plafond.

Surdimensionnement : Un système de chauffage ou de refroidissement surdimensionné ne fonctionnera que durant une courte période avant d'atteindre une température des locaux satisfaisante. Il ne fonctionnera pas aussi efficacement qu'un système d'une puissance appropriée, car la plupart des systèmes prennent plusieurs minutes avant d'atteindre leur niveau de fonctionnement optimal (voir également Dimension, dimensionnement).

Système à détente directe : Système géothermique à boucle fermée qui utilise un frigorigène plutôt que de l'eau glycolée dans la boucle souterraine.

Système à énergie du sol : voir Système géothermique.

Système de chauffage/climatisation à l'électricité : voir Système de chauffage et de conditionnement de l'air classique.

Système de chauffage et de conditionnement de l'air classique : Système qui utilise des sources d'énergie courantes sur le marché (combustibles fossiles, électricité, appareils de condensation à air) pour procurer le chauffage et le refroidissement.

Système de chauffage ou de conditionnement d'air à air pulsé : voir Système de chauffage et de conditionnement de l'air classique.

Système de chauffage par rayonnement à partir du plancher : Système de distribution de la chaleur qui réchauffe le plancher, habituellement par la circulation d'eau chaude dans des tuyaux installés dans le plancher ou par des éléments électriques dans la structure du plancher. La chaleur est diffusée dans la pièce par toute la surface du plancher. L'eau peut être chauffée par tout système de chauffage à eau chaude.

Système de distribution : Système qui distribue de l'air (ou de l'eau) chauffé ou refroidi à un bâtiment. Les systèmes à air pulsé sont habituellement dotés d'un réseau de conduits et les systèmes de chauffage à eau chaude, de conduites d'eau.

Système de puits d'eau : Dans une boucle ouverte de système géothermique, consiste habituellement en deux puits forés : un puits d'alimentation (primaire) et un puits d'injection (de retour).

Système géothermique à boucle de sol : Système géothermique à boucle fermée qui retire la chaleur directement du sol (voir également Système géothermique).

Système géothermique à eau souterraine : Système géothermique à boucle ouverte qui retire la chaleur d'eau puisée d'aquifères.

Système géothermique, système à énergie du sol : Système conçu pour transférer la chaleur entre le sol (ou un plan d'eau) et un bâtiment. Il est composé d'une pompe à chaleur branchée à une boucle souterraine ouverte ou fermée et à un système de distribution à air pulsé ou à eau chaude.

Taux de compression : Rapport entre la pression absolue après et avant la compression.

Taux de rendement énergétique en mode refroidissement (EER [*energy efficiency ratio*]) : Mesure du rendement d'un appareil de refroidissement ou de conditionnement de l'air calculé en divisant le taux de refroidissement en Btu/h par la consommation d'énergie en watts.

Température d'approche : Écart de température minimal entre l'eau souterraine et le liquide de boucle du bâtiment à l'intérieur de l'échangeur de chaleur.

Test d'infiltrométrie : Méthode pour mesurer le degré d'étanchéité d'une maison en augmentant la pression de l'air à l'intérieur par rapport à celle de l'extérieur.

Thermostat : Interrupteur qui met en marche ou arrête le système de chauffage et de conditionnement de l'air selon la température de l'endroit où il est placé (voir également Thermostat programmable).

Thermostat programmable : Dispositif qui commande la pompe à chaleur d'un système géothermique; il peut être réglé électroniquement pour effectuer diverses tâches (voir également Thermostat).

Trancheuse à chaîne : Équipement lourd mécanique qui creuse des tranchées pour l'installation de boucles souterraines.

Trou de forage : Trou vertical percé dans la terre pour y placer des tuyaux qui transféreront la chaleur du sol.

Tuyaux en polyéthylène réticulé : Tuyaux qui résistent à des températures plus élevées que les tuyaux en polyéthylène haute densité. Ils sont utilisés dans des systèmes de distribution de chaleur par le plancher (connus également comme systèmes de chauffage par rayonnement à partir du plancher), la tuyauterie d'eau sanitaire, etc.

Vanne réversible : Dispositif utilisé pour renverser le flux de frigorigène dans un système à pompe à chaleur pour lui permettre de chauffer ou de climatiser une pièce.

Vase d'expansion : Récipient raccordé à un système à liquide tel qu'une boucle souterraine ou une boucle de chauffage par rayonnement à partir du plancher, pour permettre l'expansion ou la contraction du liquide lorsque surviennent des changements de température.

Ventilateur-récupérateur de chaleur (VRC) : Échangeur de chaleur qui transfère la chaleur de l'air d'évacuation d'un bâtiment à l'air d'entrée. En pratique, de 60 à 75 p. 100 de la chaleur récupérée de l'air d'évacuation est transférée à l'air frais (voir également Dimension, dimensionnement).

Ventiloconvecteur : Échangeur de chaleur eau-air muni d'un ventilateur qui chauffe ou refroidit l'air en utilisant de l'eau chaude ou refroidie.

Annexe D : Tableau de conversion

Tableau 15. Facteurs de conversion

Pour convertir des	en	multiplier par
Btu/h	watts	0,293
Btu/h	kilowatts	0,000293
watts	Btu/h	3,413
kilowatts	Btu/h	3 413
mètres carrés	pieds carrés	10,76
pieds carrés	mètres carrés	0,093
mètres	pieds	3,281
pieds	mètres	0,305
litres	gallons US	0,264
gallons US	litres	3,785
gallons impériaux	litres	4,546
degrés Celsius	degrés Fahrenheit	1,8 et ajouter 32
degrés Fahrenheit	degrés Celsius	Soustraire 32 et multiplier par 0,555

SONDAGE

Merci de l'intérêt que vous portez à la publication *Les systèmes géothermiques commerciaux : Guide de l'acheteur* de Ressources naturelles Canada (RNCan). Afin de nous aider à mieux vous servir et à améliorer les éditions futures, nous vous prions de prendre quelques minutes pour répondre aux questions suivantes :

Comment avez-vous découvert le Guide de l'acheteur?
O Brochure d'introduction de RNCan O Distributeur O Magasin de détail
O Société canadienne de l'énergie du sol O Salon professionnel O Autre
O Autre association qui s'intéresse à l'énergie renouvelable

Cette publication vous a-t-elle renseigné?
O Oui O Non

Que saviez-vous des systèmes géothermiques avant de lire le Guide de l'acheteur?
O Tout O Plusiers choses O Un peu
O Très peu O Rien

Veuillez évaluer cette publication quant aux caractéristiques suivantes :

	Excellent	Bon	Moyen	Passable	Médiocre
Texte facile à comprendre	O	O	O	O	O
Longueur	O	O	O	O	O
Clarté	O	O	O	O	O
Caractère complet	O	O	O	O	O
Photographies	O	O	O	O	O
Éléments graphiques	O	O	O	O	O
Présentation	O	O	O	O	O

N'hésitez pas à nous faire part de vos commentaires et suggestions.

_____
_____
_____
_____
_____
_____

Si vous achetez un système, ce sera pour :
O Une application commerciale O Une application industrielle
O Autre (veuillez préciser) :

_____

Désirez-vous recevoir une liste des détaillants, installateurs et entrepreneurs dans votre région?
O Oui

Veuillez inscrire les renseignements suivants (en lettres moulées) :
Nom _____
Adresse _____
Ville _____
Province/Territoire _____ Code postal _____
Téléphone _____ Courriel _____

Après avoir rempli ce questionnaire, veuillez l'expédier à l'adresse suivante :
Division de l'énergie renouvelable et électrique
Ressources naturelles Canada
580, rue Booth, 17e étage
Ottawa (Ontario) K1A 0E4
Télécopieur : (613) 995-0087

Merci de votre collaboration

ÉNERGIES
RENOUVELABLES